

VŠB – TU OSTRAVA

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh úpravy kotle K1 v Teplárně ČSA v Karviné

Modification of the boiler K1 in the Heating Plant ČSA Karviná

Student:

Bc. Tomáš Majkus

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

Ostrava 2014

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Majkus**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení

Téma: **Návrh úpravy kotle K1 v Teplárně ČSA v Karviné**
Modification of the Boiler K1 in the Heating Plant ČSA Karviná

Zásady pro vypracování:

Na základě vyhodnocení měření účinnosti kotle K1 v Teplárně Československé armády v Karviné proveďte návrh úpravy zařízení pro zvýšení účinnosti a snížení emisí z tohoto kotle.

Diplomová práce bude obsahovat:

1. Popis stávajícího kotle K1 TČA a jeho parametry.
2. Měření a výpočet účinnosti kotle K1.
3. Přehled možných úprav pro zvýšení účinnosti a snížení emisí.
4. Výběr a popis technického řešení úprav pro kotel K1 na TČA.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení přínosu rekonstrukce.

Grafické práce:

1. Výkres kotle K1 s naznačením úpravy zařízení.
2. Konstrukční výkres úpravy vybrané části kotle.

Seznam doporučené odborné literatury:

Černý V. a kol. Parní kotle a spalovací zařízení, SNTL Praha 1975.

Kolat P. Přenos tepla a hmoty, skripta VŠB Ostrava 1987.

ON 074017 Tepelný výpočet parních kotlů.

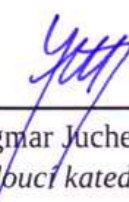
Dlouhý T. Výpočty kotlů a spalinových výměníků, skripta ČVUT Praha 2005.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Bohumír Čech**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014


prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry





doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny podklady a literaturu.

V Ostravě: 19. 5. 2014


.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 19. 5. 2014



podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Tomáš Majkus

Adresa trvalého bydliště autora práce:

Všechnovice 25, 75353

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

MAJKUS, T. *Návrh úpravy kotle K1 v Teplárně ČSA v Karvině: diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky 2014, 74s. Vedoucí práce: Čech, B.

Diplomová práce se zabývá studii možných úprav stávajícího kotle K1 v Teplárně Československé armády za účelem zvýšení účinnosti a snížení emisi. Po proměření kotle bylo navrženo rekonstruovat část přívodů paliva do spalovací komory a natočit hořáky na pomyslnou kružnici ve středu komory. První část práce obsahuje popis a výpočet účinnosti a všech ztrát kotle dle normy ČSN 070302. V další části se práce zabývá zhodnocením všech ztrát a přehledem možných úprav kotle. Následuje výběr úpravy kotle K1 a technický popis provedení.

ANNOTATION OF DISSERTATION

MAJKUS, T. *Modification of the boiler K1 in the Heating Plant ČSA Karviná: dissertation.* Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2014, 74s. Thesis head: Čech, B.

This thesis deals with the study of possible modifications to the existing heating plant boilers K1 in the Czechoslovak army in order to increase efficiency and reduce emissions. After measuring the boiler was designed to reconstruct part of the fuel supply to the combustion chamber and burner make the imaginary circle in the middle chamber. The first part contains a description of the calculation of the efficiency of a boiler loss according to CSN 070302. The next part deals with the evaluation of losses and an overview of possible modifications of the boiler. The following is a selection of boiler modifications K1 and technical description of the design.

Klíčová slova

Granulační kotel; Úprava spalování; Zvýšení účinnosti; Úpravy kotle

Keywords

Granulation boiler; Combustion modifications; Increase efficiency; Edit boilers

OBSAH

Přehled použitých značek a indexů	9
Význam značek.....	9
Význam indexů.....	10
1 Úvod	12
2 Historie Teplárny Čs. Armády	13
3 Popis kotle.....	16
3.1 Stávající technické parametry	18
3.1.1 Údaje o uvedení do provozu a hlavních provedených rekonstrukcích a úpravách	18
3.1.2 Parametry kotle	19
3.1.3 Parametry spalovaných paliv a napájecí vody	19
4 Metodika měření účinnosti na kotli K1	22
4.1 Vzorky paliva, strusky a popílku	22
4.2 Měření teploty spalin pro stanovení účinnosti	22
4.3 Metodika stanovení plynných složek spalin O ₂ a CO na výstupu z kotle pro nepřímé stanovení účinnosti	23
4.4 Stanovení popelové bilance.....	23
4.5 Průběh samotného měření na kotli K1	23
5 Předmět normy ČSN 070302	24
5.1 Oblast použití	24
5.2 Účel a rozsah	24
5.3 Energetická bilance dle ČSN 07 0302.....	25
5.3.1 Hlavní položky energetické bilance dle normy ČSN 07 0302	25
6 Výpočet dle normy ČSN 07 0302	28
6.1 Minimální objem suchého vzduchu pro dokonalé spálení	29
6.2 Minimální objem suchých spalin při dokonalém spálení.....	30

6.3	Minimální objem vody vzniklý ve spalinách při dokonalém spálení.....	30
6.4	Složky stechiometrických objemů pro dokonalé spálení:	31
6.5	Složky stechiometrických objemů ve spalinách pro dokonalé spálení	31
6.6	Parametry a konstanty spalin při nedokonalém spalování	32
6.7	Výpočet přebytku vzduchu.....	35
6.8	Skutečný objem spalin	35
6.9	Skutečný objem vlhkých spalin.....	36
6.9.1	Obsah vodní páry ve spalinách	36
6.9.2	Poměrný obsah vodní páry	37
6.10	Výpočet konstant A_0 , B_0 , C_0 :	37
6.11	Výpočet konstant A_α , B_α , C_α :	39
6.12	Výpočet konstant A , B , C :	40
6.13	Střední měrná tepelná kapacita spalin	41
6.13.1	Střední měrná tepelná kapacita spalin pro teplotu 201,6°C	41
6.13.2	Střední měrná tepelná kapacita spalin pro teplotu 20°C	41
6.13.3	Střední integrální měrná tepelná kapacita spalin.....	42
7	Výpočet nepřímé účinnosti a tepelných ztrát dle ČSN 07 0302	43
7.1	Účinnost parního kotle η stanovena nepřímou metodou.....	43
7.1.1	Ztráta hořlavinou ve spalinách:	43
7.1.2	Ztráta hořlavinou v popílku:.....	44
7.1.3	Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová):	44
7.1.4	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků.....	45
7.1.5	Ztráta sdílením tepla do okolí v závislosti na výkonu kotle:	46
7.1.6	Celková ztráta a účinnost kotle	48
8	Přehled možných uprav kotle pro zvýšení účinnosti a snížení emisí.	49
8.1	Optimalizace teploty spalin na výstupu z kotle.....	49
8.1.1	Zvětšení ohříváku vzduchu	51

8.1.2	Zvětšení jiné části (teplosměnné plochy) kotle	51
8.1.3	Vybudování nového výměníku kotle	52
8.2	Kyslík ve spalínách	54
8.3	Ztráta hořlavinou ve spalínách	55
8.4	Ztráta hořlavinou ve strusce	55
8.5	Ztráta citelným teplem tuhých zbytků.....	55
8.6	Ztráta sdílením tepla do okolí	55
8.7	Ztráta hořlavinou v popílku.....	56
9	Výběr a popis technického řešení úpravy pro kotel K1	59
9.1	Natočení hořáků	60
9.2	Navržení natočení hořáků.....	63
9.3	Cíle natočení hořáku na kružnici.....	68
10	Technicko-ekonomické zhodnocení přínosu rekonstrukce.....	69
11	Závěr	70
	Seznam obrázků a tabulek	72
	Seznam použité literatury	73
	Seznam příloh.....	74

Přehled použitých značek a indexů

Význam značek

A	$[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$	obsah popela
$A_1 - A_{10}$	[1]	
A, A_0 , A_a	[1]	konstanty pro výpočet \bar{C}_s
a_1	$[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$	podíl uhlíku paliv aspáleného na CO
$B_1 - B_{10}$	[1]	
B, B_0 , B_a	[1]	konstanty pro výpočet \bar{C}_s
b	$[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$	podíl nespáleného uhlíku paliva
C	$[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$	obsah uhlíku
$C_1 - C_{10}$	[1]	
C, C_0 , C_a	[1]	konstanty pro výpočet \bar{C}_s
\bar{C}_s	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	střední měrná tepelná kapacita
\bar{C}_{s1}	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	stře. měr. tep. kapacita tuhých zbytků
DAF	$[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$	obsah hořlaviny
H	$[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$	obsah vodíku
M	$[\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}]$	molární hmotnost plynu
m	[kg]	hmotnost
\dot{m}	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	hmotnostní tok
N	$[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$	obsah dusíku
O	$[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$	obsah kyslíku
p	[Pa; MPa]	tlak
Q	[kJ]	množství tepla
\dot{Q}	$[\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}]$	tepelný tok
Q_i^r	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	výhřevnost
Q_h^r	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	spalné teplo
$R_1 - R_7$	[1]	pomocné konstanty stecho. objemů
S	$[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$	obsah síry
t	[°C]	teplota
V	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	objem vzduchu nebo spalin
W	$[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$	obsah vody

α	[1]	součinitel přebytku vzduchu
ξ	[%]	relativní tepelná ztráta
η	[%]	účinnost
v	[1]	objem vlh. plynu obsahující 1m ³ plynu
ρ	[kg*m ³]	hustota
φ	[1]	relativní vlhkost
ω	[m ³ *m ⁻³]	objemový podíl složky ve směsi plynu

Významindexů

b	barometrický
C	uhlík, hořlavina v tuhých zbytcích
CO	oxid uhelnatý, hořlavina ve spalínách
CO ₂	oxid uhličitý
H ₂	vodík
H ₂ O	voda, vodní pára
i	složka směsi, člen souboru
j	jmenovitá hodnota
min	minimální
mp	mezipřehřátá pára
N ₂	dusík
nv	napájecí voda
O ₂	kyslík
ok	okolí
pal	palivo
pop	popílek
pp	přehřátá pára
pr	přivedený, příkon
s	spaliny
sk	struska
SO ₂	oxid siřičitý
ss	spaliny suché

sv	sdílením tepla do okolí
v	vzduch
vs	vzduch suchý
vyr	vyrobený (výkon)
z	ztráty

1 Úvod

Téma diplomové práce jsem si zvolil především z důvodu, že dávalo možnost konkrétního seznámení s kotelnou a v podstatě s chodem celé elektrárny. Jeden z dalších důvodů bylo samotné zaměření práce, které obsahovalo možnost se zúčastnit všech měření na daném kotli a samotný kotel si konkrétně projít.

Dané téma je aktuální vzhledem k tomu, že mnoho elektráren je dnes zastaralých a budou potřebovat rekonstrukci a použití nových a hospodárnějších technologií. Diplomová práce mi dává možnost se s problematikou kotlů seznámit a nabízí velkou zkušenost do profesního života.

Předmětem práce je v první řadě seznámení a popis upravovaného kotle. Dále se práce zabývá výpočtem účinnosti a ztrát dle normy ČSN 07 0302 za pomoci měření, které jsem prováděl na kotli K1. V dalším bodu je zhodnocení ztrát vycházejících z předešlého výpočtu a následný výběr mnou navrhované úpravy na kotli. Závěrečná část práce obsahuje technicko-ekonomické zhodnocení navrhované úpravy. Grafická část práce obsahuje výkresy upravované části kotle.

Cílem diplomové práce je navrhnout úpravy na kotli K1 v Teplárně ČSA Karviná za účelem zvýšení účinnosti a snížení emisí na základě mnou naměřených a vypočítaných hodnot.

2 Historie Teplárny Čs. Armády

Kapitola je zpracována dle literatury [1].

Původně Elektrárna President Beneš, od roku 1951 Elektrárna Čs. armády, od roku 1991 Teplárna Čs. Armády.

V historii této elektrárny rozlišujeme tři období, v nichž byla výroba elektřiny zajištěna na třech oddělených samostatných zdrojích, jejichž výstavba, provoz a odstavování na sebe určitým způsobem navazovaly. Pro úplnost lze uvést, že údajně úplně první zdroj stejnosměrného proudu o výkonu 0,45 MW pro potřeby tehdejší šachty Jan – Karel byl postaven již v roce 1895.

Počátky prvního období je datován do roku 1902, kdy byl na jámě Jan postaven plynový čtyřválcový čtyřtaktní motor 420kW na koksárenský plyn s alternátorem na 3kV a 30Hz střídavého proudu. Stejně hodnoty měly i alternátory dvou parních strojů o výkonech 520 kW a v roce 1907 pak parní turbína 1MW opět s alternátorem 3kV, 30Hz. V kotelně vytápěné uhlím a koksárenským plynem bylo zprvu šest kotlů Babcock-Wilcox na 12 at. a 300 – 350°C, později doplněných o další dva o něco větší kotle. Tato „centrála 1“ byla udržována v provozu do roku 1925, kdy došlo k její likvidaci.

Vzhledem k potížím, které na „centrále 1“ způsobovaly důlní poklesy, byla nová strojovna s většími jednotkami, nazývána „centrála 2“, postavena na ochranném pilíři jámy Jan. Zde byla postupně instalována turbosoustrojí o parametrech 3 MW, 3 kV a 30 Hz v roce 1910, 3 MW, 5 kV a 50 Hz v roce 1919, 3 MW, 5 kV a 50 i 30 Hz při změně otáček v roce 1920 a konečně v roce 1934, po likvidovaném prvním soustrojí z roku 1910, nové soustrojí o výkonu 6 MW. Tento poslední stroj byl odstaven v roce 1949 a později, v roce 1952, přenesen na tehdejší Elektrárnu Generál Svoboda (dnes Teplárna Přívoz). Ve strojovně pracovali rovněž dva turbo kompresory po 10 000 m³/h pro potřebu dolu. „Centrála 2“ využívala výfukovou páru dvou těžních strojů a kompresorů a pára 12 at. a 300°C byla vyráběna v původní kotelně na jámě, která byla rozšířena na osm kotlů. Po druhé světové válce byl provoz „centrály 2“ postupně likvidován a definitivně skončil v roce 1955.

Projekční záměry a příprava nové, již velkoryseji koncipované elektrárny, započaly během války u několika projektových organizací. Po válce na projektech pokračovaly Škodovy závody, Vítkovice a další.

Parametry této elektrárny, která dostala jméno Elektrárna President Beneš, byly 49 at a 435 °C. Postupně zde byly postaveny a uvedeny do provozu roštové kotle K4 (1948) a K3 (1949) o výkonu 50 t/h každý, granulační kotle K1, K2 (1952) a K5 (1955) o výkonu 75 t/h, a konečně granulační kotel K6 (1967) a K7 (1969) o výkonu 75 t/h na spalování proplásků. Ve strojovně byla postavena kondenzační soustrojí TG1 o výkonu 12 MW (1950), kondenzační soustrojí TG2 25,5MW (1954), protitlaké soustrojí TG3 o výkonu 12 MW (1966) a konečně protitlaké soustrojí TG4 o výkonu 12 MW (1966). Pro potřeby dolu byly ve společné strojovně postaveny tři turbokompresory po 60 000 m³/h, TBK1 (1949), TBK2 (1950) a TBK3 (1956).

Při vzniku Oblasti správy elektráren – trustu Ostrava ke dni 31. prosince 1951 byla elektrárna přejmenovaná na Elektrárnu Čs. Armády (v historických i současných dokumentech můžeme nalézt dvě modifikace přívlastku „Čs. Armády“, a to plné znění „Československé armády“ stejně tak jako zkratku ČSA).

Elektrárna, která od svého počátku představovala dodávkami elektřiny, páry a stlačeného vzduchu energetický zdroj pro sousední důl a koksovnu, se časem stala základním zdrojem tepla pro město Karviná, což plně respektovala i koncepce rozvoje elektrárny přechodem na teplárenský provoz. Po již dříve likvidovaném kondenzačním soustrojí TG1 bylo likvidováno i kondenzační soustrojí TG2. Přejod na teplárenský provoz přinesl i podstatné zhospodárnění výroby. Jako ve všech elektrárnách postavených v této době, bylo i zde nutno provést celou řadu racionalizačních, technických a ekologických úprav a opatření. Byly to zejména rekonstrukce odprašování, zrušení nízkých plechových komínů a stavba nového železobetonového komína, nové zauhlování a odstruskování, měření a regulace s centrálním řízením a další.

Za zmínku stojí uvést, že součástí elektrárny byla po určitou Výtopna Karviná o výkonu 5 x 5 Gcal/hod, uvedena do provozu v roce 1961, která původně patřila Bytovému podniku Karviná. Výtopna byla fyzicky zlikvidována v letech 1989 – 1990.

Se vznikem státního podniku Teplárny Karviná dostala elektrárna nové jméno odpovídající jejímu technickému a provoznímu charakteru Teplárna Čs. armády.

Teplárna dodává teplo do města Karviná a provozuje i předávací stanice včetně sekundárních rozvodů, dodávka tepla je tedy realizována až k patě zásobovaných objektů. Přímo z teplárny je zásobován Důl ČSA (viz. obr.2.1) a Koksovna ČSA.

Teplárna Čs. armády (viz. obr.2.2) je dnes spolu s úsekem CZT města Karviná součástí divize Karviná akciové společnosti Teplárny Karviná.



Obr. 2.1: Důl ČSA [2]



Obr. 2.2: Teplárna Čs. Armády v současnosti [3]

3 Popis kotle

Jedná se o granulační kotel, jednobubnový, dvojtahový, doplněný malým bubnem (čističem páry) s přirozenou cirkulací kotelní vody. Je vybaven kapsovým ohřívákem vzduchu, hadovým ohřívákem vody a vodorovným a svislým přehřívákem páry. Pro regulaci teploty páry je vybaven dvěma vstříky vlastního kondenzátu, který je získáván v kondenzátoru páry umístěném na stropu kotle.

Topeniště je vybaveno dvanácti rohovými práškovými hořáky a dvěma plynovými stabilizačními hořáky. Stěny topeniště tvoří várnice (průměr $\varnothing 83 \times 4,5$ mm), které jsou zaústěny do bubnu. Přední a zadní stěna je složena ze 40 ks a boční stěny se skládají ze 34 ks. Zavodňovací komory várníc jsou zavodněny ze spodní části bubnu.

Parní prostor hlavního bubnu je spojen 97 spojovacími trubkami rozměru $\varnothing 83 \times 4$ mm s malým bubnem. V dolní části malého bubnu jsou vyústěny 2 trubky průměru $\varnothing 83 \times 4$ mm, které slouží pro odvod zbytků vody zpět do velkého bubnu.

Sytá pára z horní části malého bubnu je vedena spojovacími trubkami do komory ležatého přehříváku. Ten je řazen ke spalínám jako protiproud. Z horní části ležatého přehříváku je pára vedena přes komoru do výstupního visutého přehříváku, který je ke spalínám řazen jako souproudý. Spojovací parovod mezi těmito přehříváky je vyveden vně kotle po obou jeho stranách (tzv. lyry) a využit pro vstřikovou regulaci teploty páry. Tímto umístěním chladičů se zvyšuje tlak vstřikového kondenzátu o hydrostatickou výšku. Kondenzát pro vstřik je získáván ze syté páry, která je přiváděna z horní části velkého bubnu do kondenzátoru. Ten je spolu s jímačem kondenzátu umístěn na výstupní plošině kotle. Jako chladicího média pro kondenzátor je použito napájecí vody, která je přivedena z výstupní komory EKO I. Napájecí voda je z kondenzátoru vyvedena do vstupní komory EKO II.

Při tomto způsobu chlazení páry (systém „Doležal“) se využívá tlakové ztráty mezi místem vstřiku a bubnem (0,38 MPa při výkonu 75 t/h). Pro zvětšení tohoto tlakového rozdílu byly vstřikové chladiče umístěny co nejnižší a tím získáno dalších 0,17 MPa (hydrostatická výška).

Teplota páry za přehřívákem I před vstřikem dosahuje cca 390 - 430 °C. Vstřikem se ochladí na cca 330 °C. Využití regulace teploty přehřáté páry systémem „Doležal“ také vyžadovalo úpravu velikosti výhřevných ploch přehříváku a ohříváku vody II. Velikost plochy přehříváku I byla zmenšena, protože v případě zachování její původní velikosti by teplota páry za přehřívákem I (čili před vstřikem) dosahovala nepřijatelných hodnot z důvodu snížení průtoku páry přes tento přehřívák o množství vstřiku chladicího kondenzátu, který je zaveden mezi přehřívák I a II. Aby neklesla účinnost kotlů z důvodu zmenšení výhřevné plochy přehříváku I (nižší vychlazení spalín), byla zvětšena plocha ohříváku vody II.

Tlakový celek kotle je vybaven 2 ks pojišťovacími armaturami na hlavním bubnu a 2 ks na výstupní komoře P XIV. Tyto armatury zajišťují bezpečný odvod páry při náhlém přerušení odběru z plného výkonu kotle. Kotel je opatřen středně těžkou zazdívkou a je izolován minerální vatou, která je chráněna oplechováním. Úpravu paliva zajišťují na kotli 3 kroužkové mlýny typu Fuller E 38 (viz. obr. 3.1 a 3.2). Palivo je v mlýnech sušeno, mleté a přímo dopravováno práškovodou do hořáků. Dopravu prášku zabezpečuje mlýnský ventilátor, který nasává pro dopravu a sušení ohřátý vzduch z ohříváku vzduchu (primární, nosný vzduch).



Obr. 3.1: Pohled na mlýn typu
Fuller E38



Obr. 3.2: Pohled na lopatky třídiče
z vnitřní strany přes návratovou klapku

Celkový vzduch do kotle je dodáván dvěma ventilátory, každý o výkonu cca 45000 m³/h při tlaku 2,5 kPa. Vzduch se potom dělí na nosný a spalovací (primární, sekundární, terciární a dohořivací). Ventilátory jsou mezi sebou propojeny vzduchovody a uzavíracími

klapkami tak, aby bylo možno v případě poruchy jednoho ventilátoru provozovat kotel jen s jedním ventilátorem. Výkon pohonu ventilátoru je 70 kW při 980 ot/min.

Pro vynášení strusky je kotel vybaven dvěma odstruskovači typu Martin. Ovládání kotle je soustředěno do velína, umístěného na kótě 7,5 m. K ovládání regulačních orgánů je použito elektrických pohonů ovládaných z řídicího systému. Ke stabilizaci je používán důlní degazační plyn a zemní plyn. Spaliny současně s popílkem jsou ze spalovací komory odsávány (přes druhý tah kotle, kouřovody a tkaninový hadicový filtr) axiálním kouřovým ventilátorem, který je umístěn na kótě 22 m. Umístění ventilátoru je až za tkaninovým hadicovým filtrem, odkud tlačí kouřové plyny přes komínovou klapku do komína vysokého 120 m, který je společný pro 4 kotle (K1, K2, K6 a K7). Výkon kouřového ventilátoru je cca 77 m³/s při teplotě 180 – 200°C. Výkon pohonu kouřového ventilátoru je 360 kW při 990 ot/min. Odlučování popílku z kouřových plynů se provádí v tkaninovém hadicovém filtru, který je situován až za kotli.

3.1 Stávající technické parametry

3.1.1 Údaje o uvedení do provozu a hlavních provedených rekonstrukcích a úpravách

Výrobce kotle:	Vítkovické železářny
Úpravy kotle:	1982 rekonstrukce regulace teploty přehřáté páry
	1992 rekonstrukce na systém „Doležal“
	1994 instalace látkového hadicového filtru
	1997 seřízení spalovacích procesů a plynofikace kotle
	2001 rekonstrukce pravého plynového hořáku – změna top. média na degazační plyn
	2007 instalace antidetů

3.1.2 Parametry kotle

Při dodržení technických podmínek výrobce zaručuje:

Jmenovitý výkon	75 t/h
Minimální výkon bez stabilizace	45 t/h
Minimální výkon se stabilizací	35 t/h
Teplotu přehřáté páry	450 (-15, +10) °C
Pracovní přetlak páry na výstupu přehř.	4,1 MPa
Nejvyšší přetlak páry na výstupu přehř.	4,15 MPa
Čistota páry podle ČSN 07 7401	0,2 mg/kg
Vodivost	1,0 μS
Účinnost kotle	82 - 85 %
Výkon mlecího zařízení	3 x 4.5 t/h (K1, K2),
Jemnost mletí zbytek na síť 900 ok/cm ²	1 - 6 %
Maximální výkon	80 t/h
Jmenovitý výkon	75 t/h (57 MW)
Hospodárný výkon	60 t/h
Minimální výkon	45 t/h
Pracovní přetlak přehřáté páry	4,1 MPa
Nejvyšší přetlak přehřáté páry	4,15 MPa
Pracovní teplota přehřáté páry	450 (-15, +10) °C
Nejvyšší teplota přehřáté páry	460 °C
Pracovní teplota napájecí vody	105 - 140 °C

3.1.3 Parametry spalovaných paliv a napájecí vody

Hlavní palivo

Černé uhlí:

Výhřevnost	23,72 MJ/kg
Obsah vody v surovém palivu	7,0 %
Obsah popela v surovém palivu	21,12 %

Obsah uhlíku v surovém palivu	62,31 %
Obsah vodíku v surovém palivu	3,72 %
Obsah dusíku v surovém palivu	0,95 %
Obsah síry v surovém palivu	0,27 %
Obsah kyslíku v surovém palivu	4,63 %
Obsah prchavých látek v sušině	31,0 %
Melitelnost	68 Hg
Zrnitost	0 – 20 mm

Palivo pro najíždění a stabilizaci

Zemní plyn:

Kvalita plynu dle ČSN 38 6110	
Výhřevnost	34,0 MJ/m ³

Složení plynu:

CH ₄	min. 85 %
H ₂	max. 0,8 %
Inerty	max. 7 %
Hustota	0,75 kg/Nm ³
Dolní mez výbušnosti	min. 5 %
Horní mez výbušnosti	max. 15 %

Důlní degazační plyn:

Kvalita plynu dle ČSN 38 6110	
Výhřevnost	cca 20,3 MJ/m ³

Složení plynu:

CH ₄	cca 54 %
O ₂	cca 5,4 %
CO ₂	cca 2,3 %

H ₂	cca 4 %
N ₂	cca 33,1 %
Dolní mez výbušnosti	min. 5 %
Horní mez výbušnosti	max. 15 %

Doplňkové palivo – biomasa

Extrahovaný šrot z rostlinných semen:

Výhřevnost	14,7 - 15,9 MJ/kg
Obsah vody v surovém palivu	9,0 - 15,84 %
Obsah popela v surovém palivu	5,5 - 12,94 %
Obsah síry v surovém palivu	0,21 - 0,31 %

Nekontaminované dřevní piliny:

Výhřevnost	8,5 - 12,3 MJ/kg
Obsah vody v surovém palivu	30,5 - 45,5 %
Obsah popela v surovém palivu	0,5 - 1,8 %
Obsah síry v surovém palivu	0,04 - 0,08 %

Napájecí voda

složení podle ČSN 07 7401	
Teplota napájecí vody	105 - 140 °C
pH při 20 °C	min. 8,5
Manganistanové číslo (ChSK)	max. 5 mgO ₂ /l
Tvrdost	max. 0,01 mmol/l
Obsah kyslíku	max. 20 µg/l
Obsah železa	max. 50 µg/l
Měrná el. vodivost při 25 °C	200 µS/cm

4 Metodika měření účinnosti na kotli K1

Měření plyných emisí CO a NO_x bylo provedeno na výstupu z odlučovače za kouřovým ventilátorem kotle. Měření na kotli jsem prováděl sám společně s akreditovanou a autorizovanou měřicí skupinou VŠB - TU Ostrava.

4.1 Vzorky paliva, strusky a popílku

Uhelné palivo bylo odebíráno z dopravních tras paliva do mlýnů. U mnou řešeného kotle K1 jsem palivo odebíral ze spodní části zásobníků surového uhlí vnitřního zauhlování.

Následnou kvartací byly vytvořeny průměrné laboratorní vzorky o hmotnosti cca 5kg. Struska byla odebírána z výsypek drtičů před vstupem na dopravní pás.

Popílek z látkových filtrů byl odebírán z dopravní trasy popílku pod látkovými odlučovači. Rozbory vzorků byly provedeny v akreditované laboratoři AmplusServis Ostrava Třebovice. Výsledky rozboru jsou uvedeny v příloze č. 1 diplomové práce.

4.2 Měření teploty spalin pro stanovení účinnosti

Měření teplot spalin v kouřovodu za kotlem bylo provedeno v souladu s normou pro sít'ovou metodu. Ve zvolených měřicích přímkách, v pravém a levém spalinovém kanálu na výstupu z kotle byly rovnoměrně umístěny vždy 2 termočlánky typu „K“ (plášťovaný termočlánek NiCr-Ni $\phi 3$ mm), které byly před měřením kalibrovány. Měřená napětí byla od termočlánků svedena kompenzačním vedením do měřicího systému firmy NATIONAL INSTRUMENTS a zaznamenávána po celou dobu zkoušky ve zvoleném intervalu 30s.

4.3 Metodika stanovení plynných složek spalin O_2 a CO na výstupu z kotle pro nepřímé stanovení účinnosti

Měření koncentrace plynných složek spalin O_2 a CO na výstupu z kotle bylo prováděno sít'ovou metodou. Ve zvolených bodech průřezu vnitřního kouřovodu L a P strana (umístění bylo shodné s umístěním termočlánků pro stanovení teploty spalin za vnitřními žaluziemi) byla vždy umístěna odběrová sonda, k níž bylo připojeno vedení vzorku. Pomocí této sondy a vzduchotěsného ventilátoru byl odsáván vzorek spalin přes odlučovač vlhkosti do odběrových vaků rychlostí cca $10 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. V odebraném vzorku byla po odloučení tuhých nečistot stanovena koncentrace O_2 a CO pomocí analyzátoru SERVOMEX, pracujícího na principu paramagnetických vlastností kyslíku a stanovení koncentrace CO v infračervené oblasti.

4.4 Stanovení popelové bilance

Rozdělení popela - na strusku a úletový popílek bylo provedeno na základě bilance popela uvedené v normě ČSN 07 0302 – Hodnocení kotlových ztrát - 10 % struska, 90 % popílek.

4.5 Průběh samotného měření na kotli K1

- 07:00 Příjezd na kotelnu TČA.
Zahájení instalace měřicí techniky na kotle K1.
Oživení měřicí techniky, kalibrace emisního měřicího vozu.
- 11:30 Ukončení instalace měřicí techniky na kotel K1.
- 12:00 Zahájení měření účinnosti na kotli K1.
- 12:10 Zahájeno vzorkování surového uhlí, strusky a popílku.
- 12:20 Zahájeno měření koncentrace O_2 a CO na výstupu spalin z kotle K1.
- 14:50 Ukončeno vzorkování strusky a popílku.
- 15:00 Ukončeno měření emisí při zkoušce účinnosti.
- 15:15 Demontáž měřicí techniky z kotle K1.
- 16:30 Odjezd z TČA.

5 Předmět normy ČSN 070302

V této kapitole se budu zabývat obecně seznámením s normou ČSN 070302, kterou jsem použil v další kapitole diplomové práce a to výpočtu účinnosti a ztrát na kotli K1. Informace v této kapitole jsou čerpány z literatury [4].

5.1 Oblast použití

Tato norma slouží pro přípravu, provádění a vyhodnocování přejímacích a záručních zkoušek parních kotlů. Platí pro parní kotle (popřípadě horkovodní kotle) s tepelným výkonem nad 0,07MPa a nebo s teplotou vody nad 115°C, vytápěné buď spalínami z vlastního ohniště, nebo teplem z jiného zdroje (elektrickým teplem, odpadním teplem z metalurgické pece, teplem jiné teplonosné látky).

Tato norma se nevztahuje: na parní kotle spalující neobvyklá paliva (například odpadky) a na parní kotle s ohništěm pracujícím s přetlakem větším než 2,5kPa. Ustanovení této normy mohou být použita jako základ nebo vodítko pro zkoušky na výše uvedených zařízeních zvláštní konstrukce nebo pracujících s neobvyklou teplonosnou látkou, nebo i na jiných teplosměnných zařízeních zvláštního určení, jen tehdy:

- budu-li respektovat specifické podmínky anebo fyzické vlastnosti zařízení i pracovních látek;
- budou-li podstatné zvláštnosti (odlišnosti) vytčeny už v kontraktu; přitom musí být dohodnuto, jakým způsobem budou tyto odlišnosti respektovány při měřeních a jejich vyhodnocováních.

5.2 Účel a rozsah

Účelem této normy je stanovit pravidla přejímacích zkoušek, jimiž se má prokázat splnění parametrů zaručovaných v kontraktu; jde zejména o výkon parního kotle, parametry přehřáté páry i mezi přehřáté páry (popřípadě vody) a účinnost (popřípadě jmenovitě určené ztráty). Norma obsahuje m.j.:

- pokyny pro přípravu a provedení přijímacích zkoušek
- určení bilančních hranic zkoušeného zařízení
- směrnice pro určení nejistoty měření a přepočet výsledků na smluvní podmínky

Doporučuje se, aby veškerá ustanovení této normy byla uplatňována nebo sloužila jako vodítko při provádění běžných i kontrolních měření a zkoušek za normálního provozu parních kotlů.

Smluvní podmínky se mohou týkat zejména:

- rozsahu dodávky, hranic soustavy, vztažné teploty;
- způsob stanovení účinnosti (přímým nebo nepřímým způsobem);
- dodatečných měření;
- podmínek zkoušky;
- odkalování a odluhování, ofukování výhřevných ploch;
- atd.

5.3 Energetická bilance dle ČSN 070302

Nejdůležitější podmínkou při výpočtu účinnosti je správné vymezení soustavy, v jejímž rozsahu se tvoří energetická bilance parního kotle. Hranice soustavy musí být vytýčena tak, aby bylo možné správně a jednoznačně měřit všechny hmotnostní a energetické toky, které vstupují a vystupují ze soustavy viz. *obr. 5.1*.

5.3.1 Hlavní položky energetické bilance dle normy ČSN 07 0302

Příkon:

- 11 Teplo chemicky vázané v palivu- Výhřevnost
- 12 Fyzické teplo dodané palivu z cizího zdroje
- 13 Fyzické teplo dodané spalovacímu vzduchu z cizího zdroje
- 14 Fyzické teplo a jiné energie přivedené mimo spalovací proces

Ztráty:

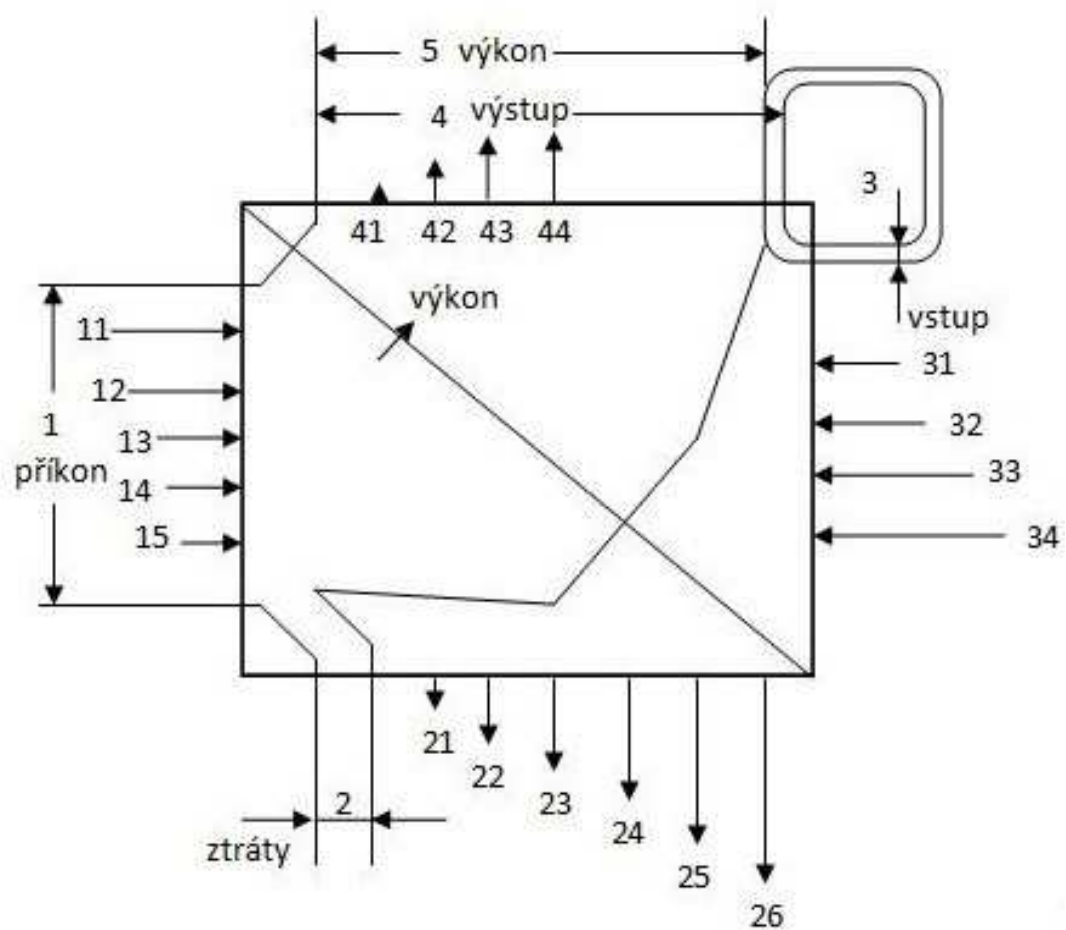
- 21 Hořlavinou ve spalínách
- 22 Fyzickým teplem spalin (komínová)
- 23 Hořlavinou v tuhých zbytcích
- 24 Fyzickým teplem tuhých zbytků
- 25 Sdílením tepla do okolí
- Chlazením

Vstup pracovní látky do parního kotle:

- 31 Teplo v napájecí vodě
- 32 Teplo ve vodě vstříkované do přehřáté páry
- 33 Teplo ve vratné páře vstupující do mezipřehříváku
- 34 Teplo ve vodě vstříkované do mezipřehřívání páry

Výstup pracovní látky z parního kotle:

- 41 Teplo v syté nebo přehřáté páře (popř. horké vodě)
- 42 Teplo v mezipřehřáté páře
- 43 Teplo odebrané v páře nebo vodě



Obr. 5.1: Obecné schéma energetické bilance parního kotle dle ČSN 07 0302

6 Výpočet dle normy ČSN 07 0302

V této kapitole jsem provedl sled výpočtů dle normy ČSN 07 0302. Tyto výpočty jsou důležité k určení hrubé nepřímé účinnosti a tepelných ztrát kotle. Při výpočtu jsem vycházel z literatury [4].

Stanovení účinnosti nepřímou metodou, tedy vyjádřením tepelných ztrát kotle, se využívá především u kotlů spalujících tuhá paliva na roštu, ve vznosu či ve fluidní vrstvě (např. černé nebo hnědé uhlí, biomasu, atd.).

Abych mohl stanovit tepelnou účinnost kotle nepřímou metodou, je nutné definovat vstupní parametry pro výpočet. Následující veličiny v *tabulce 6.1* jsem naměřil na již zmíněném měření na TČA na kotli K1 dne 2. 12. 2013 a vyjadřují přehled parametrů nutných pro výpočet účinnosti kotle. Taktéž to je u *tabulky 6.2*, která vychází z rozboru paliva černého uhlí, které bylo mnou odebráno na kotli K1, akreditovanou společností AmpluServis.

Veličina	Hodnota	Jednotka
Teplota páry	442,80	°C
Tlak páry	3,87	Mpa
Množství páry	73,04	t.h ⁻¹
Teplota napájecí vody	108,90	°C
Tlak napájecí vody	5,47	MPa
Jmenovitý výkon	57,00	MW
Srovnávací tep. vzdu.	20,00	°C
Naměřená tep. vzdu.	18,00	°C
Teplota spalin	201,6	°C
O ₂ (spaliny)	7,7	%
CO ₂ (spaliny)	62	ppm
SO ₂ (spaliny)	0	ppm
Teplota spalin	201,6	°C
Nedopal popela	4,2	%
Nedopal popílku	26,93	%

Zachycení popela	10	%
Zachycení popílku	90	%
Teplota popela	600	°C

Tab. 6.1: Přehled parametrů kotle K1

Výhřevnost	26140	kJ*kg ⁻¹
Popel A ^r	16,37	%
Voda W ^r	8,40	%
Uhlík C ^r	67,61	%
Vodík H ^r	3,45	%
Síra S ^r	0,34	%
Dusík N ^r	0,99	%
Kyslík O ^r	2,84	%

Tab. 6.2: Přehled hodnot černého uhlí
z kotle K1

6.1 Minimální objem suchého vzduchu pro dokonalé spálení

Za předpokladu, že spalování je dokonalé, vypočtou se stechiometrické objemy spalovacího vzduchu a vzniklých spalin z následujících rovnic:

$$V_{V_{Smin}} = \frac{22,39}{0,2095} * \left(\frac{C^r}{12,011} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r_{prch}}{32,066} - \frac{O^r}{32} \right) [m_N^3 * kg^{-1}] \quad (6 - 1)$$

$$V_{V_{Smin}} = \frac{22,39}{0,2095} * \left(\frac{67,608}{12,01} + \frac{3,453}{4,032} + \frac{0,34}{32,06} - \frac{2,421}{32} \right)$$

$$V_{V_{Smin}} = 6,8648 [m_N^3 * kg^{-1}]$$

Kde: C^r, H^r, O^r jsou obsahy složek v surovém vzorku paliva [%]
S^r_{prch} je obsah prchavé složky síry v surovém palivu [%]

Jelikož prchavá složka sirý je v českém uhlí zastoupena z 95%, tak při výpočtu používám celkový obsah síry v palivu.

6.2 Minimální objem suchých spalin při dokonalém spálení

$$V_{SSmin} = \frac{22,26}{12,011} * C^r + \frac{21,89}{32,066} * S^r + \frac{22,40}{28,016} * N^r + 0,7905 * V_{VSmin} \text{ [m}_N^3 * \text{kg}^{-1}] \quad (6 - 2)$$

$$V_{SSmin} = \frac{22,26}{12,011} * 0,67608 + \frac{21,89}{32,066} * 0,0034 + \frac{22,40}{28,016} * 0,00986 + 0,7905 * 6,8648$$

$$V_{SSmin} = 6,6898 \text{ [m}_N^3 * \text{kg}^{-1}]$$

Kde: N^r je obsah dusíku v surovém vzorku paliva [%]

V_{VSmin} je minimální objem suchého vzduchu $[\text{m}_N^3 * \text{kg}^{-1}]$

6.3 Minimální objem vody vzniklý ve spalinách při dokonalém spálení

$$V_{SH_2Omin} = 11,111 * H^r + 1,2433 * W^r + (1 - v) * V_{VSmin} \text{ [m}_N^3 * \text{kg}^{-1}] \quad (6 - 3)$$

$$V_{SH_2Omin} = 11,111 * 0,03453 + 1,2433 * 0,0840 + (1 - 1,016) * 6,8648$$

$$V_{SH_2Omin} = 0,6095 \text{ [m}_N^3 * \text{kg}^{-1}]$$

Kde: H^r je obsah vodíku v surovém vzorku paliva [%]

W^r je obsah veškeré vody v surovém vzorku paliva [%]

Přitom v je součinitel vyjadřující podíl vodní páry na 1 m_N^3 suchého vzduchu a je dán vztahem:

$$v = 1 + \frac{\varphi_v * P''}{P_b - \varphi_v * P''} \quad [1] \quad (6 - 4)$$

$$v = 1 + \frac{0,7 * 0,0023368}{0,098 - 0,7 * 0,0023368}$$

$$v = 1,016 \quad [1]$$

Kde: φ je relativní vlhkost vzduchu [1]

P_b je barometrický tlak [Pa]

p'' je parciální tlak vodní páry na mezi sytosti při dané teplotě vzduchu [Pa]

Parciální tlak P'' jsem volil z *tabulky 6.3*, dle naměřené teploty vzduchu t_v na kotli K1.

t_v [°C]	0	10	20	30	40
p'' [MPa]	0,0006108	0,0012277	0,0023368	0,0042416	0,0073742

Tab. 6.3: Parciální tlak v závislosti na teplotě[5]

6.4 Složky stechiometrických objemů pro dokonalé spálení:

Objem oxidu uhličitého (CO_2):

$$V_{\text{VCO}_2} = 0,0003 * V_{\text{VSmin}} [\text{m}_\text{N}^3 * \text{kg}^{-1}] \quad (6 - 5)$$

$$V_{\text{VCO}_2} = 0,0003 * 6,8468 = 0,002059 [\text{m}_\text{N}^3 * \text{kg}^{-1}]$$

Objem dusíku (N_2):

$$V_{\text{VN}_2} = 0,7809 * V_{\text{VSmin}} [\text{m}_\text{N}^3 * \text{kg}^{-1}] \quad (6 - 6)$$

$$V_{\text{VN}_2} = 0,7809 * 6,8648 = 5,224 [\text{m}_\text{N}^3 * \text{kg}^{-1}]$$

Objem vzniklých částic (A_r):

$$V_{\text{VA}_r} = 0,0093 * V_{\text{VSmin}} [\text{m}_\text{N}^3 * \text{kg}^{-1}] \quad (6 - 7)$$

$$V_{\text{VA}_r} = 0,0093 * 6,8648 = 0,0638 [\text{m}_\text{N}^3 * \text{kg}^{-1}]$$

Kde: V_{VSmin} je minimální objem suchého vzduchu $[\text{m}_\text{N}^3 * \text{kg}^{-1}]$

6.5 Složky stechiometrických objemů ve spalínách pro dokonalé spálení

Objem oxidu uhličitého (CO_2):

$$V_{\text{SCO}_2} = \frac{22,26}{12,011} * C^r [\text{m}_\text{N}^3 * \text{kg}^{-1}] \quad (6 - 8)$$

$$V_{\text{SCO}_2} = \frac{22,26}{12,011} * 0,67608 = 1,2530 [\text{m}_\text{N}^3 * \text{kg}^{-1}]$$

Objem oxidu siřičitého (SO_2):

$$V_{\text{SSO}_2} = \frac{21,89}{32,066} * S^r [\text{m}_\text{N}^3 * \text{kg}^{-1}] \quad (6 - 9)$$

$$V_{\text{SSO}_2} = \frac{21,89}{32,066} * 0,0034 = 0,002321 [\text{m}_\text{N}^3 * \text{kg}^{-1}]$$

Objem dusíku (N_2):

$$V_{\text{SN}_2} = \frac{22,40}{28,016} * N^r [\text{m}_\text{N}^3 * \text{kg}^{-1}] \quad (6 - 10)$$

$$V_{\text{SN}_2} = \frac{22,40}{28,016} * 0,00986 = 0,007883 [\text{m}_\text{N}^3 * \text{kg}^{-1}]$$

Dále pro nedokonalé spalování platí:

$$V_{\text{SCO}} = \frac{22,41}{12,01} * C^r [\text{m}_\text{N}^3 * \text{kg}^{-1}] \quad (6 - 11)$$

$$V_{\text{SCO}} = \frac{22,41}{12,011} * 0,67608 = 1,2614 [\text{m}_\text{N}^3 * \text{kg}^{-1}]$$

$$V_{\text{O}_2}(\text{C}) = \frac{22,39}{12,011} * C^r [\text{m}_\text{N}^3 * \text{kg}^{-1}] \quad (6 - 12)$$

$$V_{\text{O}_2}(\text{C}) = \frac{22,39}{12,011} * C^r = 1,2603 [\text{m}_\text{N}^3 * \text{kg}^{-1}]$$

6.6 Parametry a konstanty spalin při nedokonalém spalování

Výpočet těchto základních parametrů spalin charakterizujících dokonalost (kvalitu) spalovacího pochodu se provede na základě vyhodnocení naměřených objemových podílů složek plynu v suchých spalinách (ω_{CO} a ω_{O_2}) v příslušném řezu spalinového traktu a podílu obsahu uhlíku C_i v jednotlivých složkách tuhých zbytků (popela a popílku) dle rovnic:

Podíl uhlíku, který neshoří vůbec a odchází ze spalovacího zařízení spolu s tuhými zbytky:

$$b = \frac{A^r}{C^r} \sum_{i=1}^n \frac{C_i * X_i}{1 - C_i} [\text{kg} * \text{kg}^{-1}] \quad (6 - 13)$$

$$b = \frac{0,1637}{0,67608} * \left(\frac{0,042 * 0,1}{1 - 0,42} \right) + \left(\frac{0,2693 * 0,9}{1 - 0,2693} \right)$$

$$b = 0,0820 [\text{kg} * \text{kg}^{-1}]$$

Kde:	A^r	je obsah popela v surovém vzorku paliva	[%]
	C^r	je obsah uhlík v surovém vzorku paliva	[%]
	C_1	je nedopal popela	[%]
	C_2	je nedopal popílku	[%]
	X_1	je záchyt popela	[%]
	X_2	je záchyt popílku	[%]

Podíl uhlíku, který shoří nedokonale na plynou složku CO:

$$a_1 = \frac{R7 * \omega_{CO}}{R1 * \omega_{O_2} * R2 * \omega_{CO} * R3} \quad (6 - 14)$$

$$a_1 = \frac{8,9127 * \frac{67}{1000000}}{-8,6582 * 0,077 + 3,4070 * \frac{67}{1000000} + 1,8139}$$

$$a_1 = 0,000481 \text{ [kg * kg}^{-1}\text{]}$$

Kde:	ω_{CO}	naměřená koncentrace oxidu uhelnatého ve spalínách	[1]
	ω_{O_2}	naměřená koncentrace kyslíku ve spalínách	[1]
	R_i	jsou vypočítané konstanty z rovnic 6 - 15 až 6 - 21	[1]

Výpočet konstant R1 až R7:

$$R1 = -V_{Smin} * V_{SCO} \text{ [1]} \quad (6 - 15)$$

$$R1 = -6,8640 * 1,2614$$

$$\underline{R1 = -8,6582 \text{ [1]}}$$

$$R2 = V_{Smin}(0,5 * VO_2(C) - 0,2095 * V_2) \text{ [1]} \quad (6 - 16)$$

$$R2 = 6,8648 * (0,5 * 1,2630 - 0,2095 * 0,6386)$$

$$\underline{R2 = 3,4070 \text{ [1]}}$$

$$R3 = 0,2095 * V_{Smin} * V_{SCO} \text{ [1]} \quad (6 - 17)$$

$$R3 = 0,2095 * 6,8640 * 1,2614$$

$$\underline{R3 = 1,8139 \text{ [1]}}$$

$$R4 = V_{SCO} * (V_1 + b * V_3) [1] \quad (6 - 18)$$

$$R4 = 1,2614 * (-0,175 + 0,0820 * 0,0073)$$

$$\underline{R4 = -0,2119} [1]$$

$$R5 = V_2 * (b * V_{O_2}(C) - 0,2095 * V_{VSmin}) - 0,5 * V_{O_2}(C) * (V_1 + b * V_3) [1] \quad (6 - 19)$$

$$R5 = 0,6386 * (0,0820 * 1,2603 - 0,2095 * 6,8648) - 0,5 * 1,2603 * (-0,175 + 0,0820 * 0,0073)$$

$$\underline{R5 = -0,8524} [1]$$

$$R6 = V_{SCO} * (0,2095 * V_{VSmin} - b * V_{O_2}(C)) [1] \quad (6 - 20)$$

$$R6 = 1,2614 * (0,2095 * 6,8648 - 0,0820 * 1,2603)$$

$$\underline{R6 = 1,6837} [1]$$

$$R7 = V_{VSmin} * (0,2095 * (V_1 + b * V_3) + 0,2095 * V_{VSmin} - b * V_{O_2}(C)) [1] \quad (6 - 21)$$

$$R7 = 6,8648 * (0,2095 * (-0,175 + 0,0820 * 0,0073) + 0,2095 * 6,8648 - 0,0820 * 1,2603)$$

$$\underline{R7 = 8,9127} [1]$$

Přičemž platí:

$$V_1 = V_{SSmin} - V_{VSmin} [m_N^3 * kg^{-1}] \quad (6 - 22)$$

$$V_1 = 6,6898 - 6,8648$$

$$V_1 = -0,175 [m_N^3 * kg^{-1}]$$

Kde: V_{SSmin} je minimální objem suchého vzduchu $[m_N^3 * kg^{-1}]$

V_{VSmin} je minimální objem suchých spalín $[m_N^3 * kg^{-1}]$

$$V_2 = V_{SCO} + 0,5 * V_{O_2}(C) - V_{SCO_2} [m_N^3 * kg^{-1}] \quad (6 - 23)$$

$$V_2 = 1,2614 + 0,5 * 1,2603 - 1,2530$$

$$V_2 = 0,6386 [m_N^3 * kg^{-1}]$$

$$V_3 = V_{O_2}(C) - V_{SCO_2} [m_N^3 * kg^{-1}] \quad (6 - 24)$$

$$V_3 = 1,2603 - 1,2530$$

$$V_3 = 0,0073 [m_N^3 * kg^{-1}]$$

6.7 Výpočet přebytku vzduchu

Aby nedocházelo k nedokonalému spalování je potřeba spalovat s určitým přebytkem vzduchu, který je dán vztahem:

$$\alpha = \frac{R4 * \omega_{O_2} + R5 * \omega_{CO} + R6}{R1 * \omega_{O_2} + R2 * \omega_{CO} + R3} [1] \quad (6 - 25)$$

$$\alpha = \frac{-0,2199 * 0,077 + (-0,8524 * \frac{62}{10000000}) + 1,6837}{-8,6582 * 0,077 + 3,4070 * \frac{62}{1000000} + 1,8139}$$

$$\alpha = 1,453 [1]$$

Kde: ω_{O_2} je objem kyslíku ve spalinách [%]
 ω_{CO} je objem kyslíku uhelnatého [ppm]
 R_i jsou vypočtené konstanty [1]

6.8 Skutečný objem spalin

Objem spalin vzniklých spálením 1kg paliva v místě na odchodu z PK.

$$V_{SS} = V_{SSmin} + a_1 * (V_{SCO} + 0,5 * V_{O_2}(C) - V_{SCO_2}) + b * (V_{O_2}(C) - V_{SCO_2}) + (\alpha - 1) * V_{SSmin} [m_N^3 * kg^{-1}] \quad (6 - 26)$$

$$V_{SS} = 6,6848 + 0,000481 * (1,2614 + 0,5 * 1,2603 - 1,2530) + 0,0820 * (1,2603 - 1,2530) + (1,453 - 1) * 6,8648$$

$$V_{SS} = 9,7954 [m_N^3 * kg^{-1}]$$

Kde:	a_1	je podíl uhlíku, který neshoří dokonale na plynnou složku CO	[1]
	b	je podíl uhlíku, který neshoří vůbec a odchází ze spalovacího zařízení spolu s tuhými zbytky	[1]
	α	je přebytek vzduchu	[1]
	V_{SSmin}	je minimální objem suchého vzduchu	$[m_N^3 * kg^{-1}]$
	V_{VSmin}	je minimální objem suchých spalin	$[m_N^3 * kg^{-1}]$
	$V_{SCO}, V_{O_2}(C), V_{SCO_2}$	složky stecho. objemů ve spalinách	$[m_N^3 * kg^{-1}]$

6.9 Skutečný objem vlhkých spalin

$$V_S = V_{SS} + V_{SH_2O} [m_N^3 * kg^{-1}] \quad (6 - 27)$$

$$V_S = 9,7954 + 0,6515$$

$$V_S = 10,44 [m_N^3 * kg^{-1}]$$

Kde:	V_{SS}	je skutečný objem suchých spalin	$[m_N^3 * kg^{-1}]$
	V_{SH_2O}	je obsah vodní páry ve spalinách (rovnice 6 - 28)	$[m_N^3 * kg^{-1}]$

6.9.1 Obsah vodní páry ve spalinách

$$V_{SH_2O} = V_{SH_2Omin} + (\alpha - 1) * (v - 1) * V_{VSmin} [m_N^3 * kg^{-1}] \quad (6 - 28)$$

$$V_{SH_2O} = 0,6005 + (1,453 - 1) * (1,0164 - 1) * 6,8648$$

$$V_{SH_2O} = 0,6515 [m_N^3 * kg^{-1}]$$

Kde:	V_{SH_2Omin}	je minimální objem vody vzniklý ve spalinách při dokonalém spálení	$[m_N^3 * kg^{-1}]$
	α	je přebytek vzduchu	[1]
	v	je součinitel vyjadřující podíl vodní páry na 1 m_N^3 suchého vzduchu	[1]
	V_{vsmin}	je minimální objem suchých spalin	$[m_N^3 * kg^{-1}]$

6.9.2 Poměrný obsah vodní páry

$$\omega_{H_2O} = \frac{V_{SH_2O}}{V_S} \quad [1] \quad (6 - 29)$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{0,6515}{10,44} = 0,062 \quad [1]$$

Kde: V_S je skutečný objem vlhkých spalin $[m_N^3 * kg^{-1}]$

6.10 Výpočet konstant A_0 , B_0 , C_0 :

Pro známe složení paliva je možné dále jednotlivé konstanty rozepsat a vypočítat dle následujících vztahů:

Výpočet konstanty A_0 :

$$A_0 = [(1 - a_1 - b) * V_{sCO_2} + V_{vCO_2}] * A1 + V_{sSO_2} * A2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) * A3 + V_{vA_r} * A4 + V_{sH_2O} * A5 + A^r * (1 - X_{sk}) * A7 - V_{vsmín} * (A6 + (v - 1) * A5) + (0,5 * a_1 + b) * V_{O_2}(C) * C8 + a_1 * V_{sCO} * A9 [1] \quad (6 - 30)$$

$$\begin{aligned} A_0 = & [(1 - 0,000481 - 0,0820) * 1,2530 + 0,002059] * 2,5903 * 10^{-4} + 0,002321 \\ & * 1,7912 * 10^{-4} + (0,007883 + 5,224) * 1,1366 * 10^{-4} + 0,0638 \\ & * 1,0336 * 10^{-4} + 0,6515 * 2,5071 * 10^{-4} + 0,1637 * (1 - 0,1) \\ & * 3,1338 * 10^{-4} - 6,8648 \\ & * (1,2056 * 10^{-4} + (1,016 - 1) * 2,5071 * 10^{-4}) \\ & + (0,5 * 0,000481 + 0,0820) * 1,2603 * 1,0688 + 0,000481 * 1,2614 \\ & * 1,1490 * 10^{-4} \end{aligned}$$

$$A_0 = 0,000242 \quad [1]$$

Kde: a_1 podíl uhlíku, který shoří nedokonale na plynnou složku CO [1]
 b je podíl uhlíku, který neshoří vůbec a odchází ze spalovacího zařízení spolu s tuhými zbytky [1]
 A^r je obsah popela v surovém vzorku paliva [%]

X_{sk}	je zachycení popela	[%]
V_{vmin}	je minimální objem suchých spalin	$[m_N^3 * kg^{-1}]$
v	je souč. vyjadřující podíl vodní páry na 1 m_N^3 suchého vzduchu	[1]
A_i	jsou koeficienty z <i>tabulky 6.4</i>	[1]

Výpočet konstanty B_0 :

$$B_0 = [(1 - a_1 - b) * V_{sCO_2} + V_{vCO_2}] * B1 + V_{sSO_2} * B2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) * B3 + V_{vAr} * B4 + V_{sH_2O} * B5 + A^r * (1 - X_{sk}) * B7 - V_{vmin} * (B6 + (v - 1) * B5) + (0,5 * a_1 + b) * V_{O_2}(C) * B8 + a_1 * V_{sCO} * B9 [1] \quad (6 - 31)$$

$$B_0 = [(1 - 0,000481 - 0,0820) * 1,2530 + 0,002059] * 2,0121 + 0,002321 * 2,1566 \\ + (0,007883 + 5,224) * 1,2827 + 0,0638 * 0,9281 + 0,6515 * 1,5643 \\ + 0,1637 * (1 - 0,1) * 0,6757 - 6,8648 \\ * (1,2908 + (1,016 - 1) * 1,4643) + (0,5 * 0,000481 + 0,0820) \\ * 1,2603 * 1,3831 + 0,000481 * 1,2614 * 1,2993$$

$$B_0 = 1,5044 [1]$$

Kde: B_i jsou koeficienty z *tabulky 6.4* [1]

Výpočet konstanty C_0 :

$$C_0 = [(1 - a_1 - b) * V_{sCO_2} + V_{vCO_2}] * C1 + V_{sSO_2} * C2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) * C3 + V_{vAr} * C4 + V_{sH_2O} * C5 + A^r * (1 - X_{sk}) * C7 - V_{vmin} * (C6 + (v - 1) * C5) + (0,5 * a_1 + b) * V_{O_2}(C) * C8 + a_1 * V_{sCO} * C9 [1] \quad (6 - 32)$$

$$C_0 = [(1 - 0,000481 - 0,0820) * 1,2530 + 0,002059] * (-47,7837) + 0,002321 \\ * (-43,4667) + (0,007883 + 5,224) * (-0,0391) + 0,0638 * 0,3719 \\ + 0,6515 * 6,6196 + 0,1637 * (1 - 0,1) * 2,7078 - 6,8648 \\ * (-1,6503 + (1,016 - 1) * 6,6196) + (0,5 * 0,000481 + 0,0820) \\ * 1,2603 * (-13,6304) + 0,000481 * 1,2614 * (-3,3038)$$

$$C_0 = -41,832 [1]$$

Kde: C_i jsou koeficienty z *tabulky 6.4* [1]

6.11 Výpočet konstant A_α , B_α , C_α :

Konstanta A_α :

$$A_\alpha = V_{vsmín} * (A6 + (\nu - 1) * A5) [1] \quad (6 - 33)$$

$$A_\alpha = 6,8648 * (1,2065 * 10^{-4} + (1,016 - 1) * 2,5071 * 10^{-4})$$

$$A_\alpha = 0,000856 [1]$$

Kde: $V_{vsmín}$ je minimální objem suchý spalin $[m_N^3 * kg^{-1}]$

ν je součinitel vyjadřující podíl vodní páry na 1 m_N^3 suchého
vzduchu [1]

A_i jsou koeficienty z *tabulky 6.4* [1]

Konstanta B_α :

$$B_\alpha = V_{vsmín} * (B6 + (\nu - 1) * B5) [1] \quad (6 - 34)$$

$$B_\alpha = 6,8648 * (1,2908 + (1,016 - 1) * 1,4643)$$

$$B_\alpha = 9,026 [1]$$

Kde: B_i jsou koeficienty z *tabulky 6.4* [1]

Konstanta C_α :

$$C_\alpha = V_{vsmín} * (C6 + (\nu - 1) * C5) [1] \quad (6 - 35)$$

$$C_\alpha = 6,8648 * (-1,6503 + (1,016 - 1) * 6,6196)$$

$$C_\alpha = -10,5837 [1]$$

Kde: C_i jsou koeficienty z *tabulky 6.4* [1]

Přičemž konstanty A, B, C lze v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu vyjádřit:

6.12 Výpočet konstant A, B, C:

Konstanta A:

$$A = A_0 + \alpha * A_\alpha \text{ [1]} \quad (6 - 36)$$

$$A = 0,000242 + 1,453 * 8,5648 * 10^{-4}$$

$$A = 0,0014864 \text{ [1]}$$

Konstanta B:

$$B = B_0 + \alpha * B_\alpha \text{ [1]} \quad (6 - 37)$$

$$B = 1,5044 + 1,453 * 9,026$$

$$B = 14,6192 \text{ [1]}$$

Konstanta C:

$$C = C_0 + \alpha * C_\alpha \text{ [1]} \quad (6 - 38)$$

$$C = -41,832 + 1,453 * (-10,5837)$$

$$C = -57,2101 \text{ [1]}$$

Kde: α je přebytek vzduchu [1]

I	Složka	A(I)	B(I)	C(I)
1	CO ₂	2,5903118x10 ⁻⁴	2,0121359	-47,7836646
2	SO ₂	1,7911607x10 ⁻⁴	2,1566298	-43,46660944
3	N ₂	1,1365887x10 ⁻⁴	1,2827182	-0,0390503
4	Ar	1,033607x10 ⁻⁴	0,9281643	+0,3719149
5	H ₂ O	2,5070758x10 ⁻⁴	1,4643053	+6,6195562
6	Vzduchsuch	1,2065266x10 ⁻⁴	1,2907768	-1,6503075
7	Popel	3,1337938x10 ⁻⁴	0,6756903	+2,7077545
8	O ₂	1,0687881x10 ⁻⁴	1,3830632	-13,6303648
9	CO	1,1490349x10 ⁻⁴	1,2992527	-3,3037630
10	CH ₄	2,5903118x10 ⁻⁴	2,0121359	-47,7836646

Tab. 6.4: Koeficienty A(I), B(I), C(I) složek spalín a vzduchu [4]

6.13 Střední měrná tepelná kapacita spalín

Střední měrná tepelná kapacita spalín při teplotě t [$^{\circ}\text{C}$] je daná obecným vztahem:

$$\bar{c}_s(t) = \frac{A * t + B + \frac{C}{t}}{V_s} [kJ * kg^{-1} * K^{-1}] \quad (6 - 39)$$

Kde: t je daná teplota [$^{\circ}\text{C}$]
 V_s je skutečný objem vlhkých spalín [$\text{m}^3 * \text{kg}^{-1}$]
 A, B, C jsou vypočítané konstanty z rovnice 6-36, 6-37, 6-38 [1]

6.13.1 Střední měrná tepelná kapacita spalín pro teplotu 201,6 $^{\circ}\text{C}$

$$\bar{c}_s(t_k) = \frac{1,4864 * 10^{-3} * 201,6 + 14,6192 + \left(\frac{-57,2101}{201,6}\right)}{10,4468} [kJ * kg^{-1} * K^{-1}] \quad (6 - 40)$$

$$\bar{c}_s(t_k) = 1,4 [kJ * kg^{-1} * K^{-1}]$$

Kde: t je naměřená teplota spalín 201,6 [$^{\circ}\text{C}$]

6.13.2 Střední měrná tepelná kapacita spalín pro teplotu 20 $^{\circ}\text{C}$

$$\bar{c}_s(t_0) = \frac{A * t_0 + B + \frac{C}{t_0}}{V_s} [kJ * kg^{-1} * K^{-1}] \quad (6 - 41)$$

$$\bar{c}_s(t_0) = \frac{1,4864 * 10^{-3} * 20 + 14,6192 + \left(\frac{-57,2101}{20}\right)}{10,4468}$$

$$\bar{c}_s(t_0) = 1,1284 [kJ * kg^{-1} * K^{-1}]$$

Kde: t_0 je srovnávací teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]

6.13.3 Střední integrální měrná tepelná kapacita spalin

$$\bar{c}_s = \frac{\bar{c}_s(t_k) * t_k + \bar{c}_s(t_0) * t_0}{t_k - t_0} [kJ * kg^{-1} * K^{-1}] \quad (6 - 42)$$

$$\bar{c}_s = \frac{1,4 * 201,6 + 1,1284 * 20}{201,6 - 20}$$

$$\bar{c}_s = 1,43 [kJ * kg^{-1} * K^{-1}]$$

7 Výpočet nepřímé účinnosti a tepelných ztrát dle ČSN 07 0302

Tato kapitola se bude zabývat konkrétním výpočtem jednotlivých ztrát a celkové nepřímé účinnosti. Kapitola vychází z literatury [4].

7.1 Účinnost parního kotle η stanovena nepřímou metodou

$$\eta = 1 - \xi_{co} - \xi_c - \xi_k - \xi_f - \xi_{sv} - \xi_{ch} [\%] \quad (7 - 1)$$

Kde	ξ_{co}	ztráta hořlavinou ve spalínách	[%]
	ξ_c	ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích	[%]
	ξ_k	ztráta fyzickým teplem spalin (komínová)	[%]
	ξ_f	ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	[%]
	ξ_{sv}	ztráta sdílením tepla do okolí	[%]

7.1.1 Ztráta hořlavinou ve spalínách:

Ztráta je dána chemickou nedokonalostí spalování, projevující se obsahem nespálených plynů CO, H₂, CH₄ a event. dalšími ve spalínách.

$$\xi_{co} = \frac{12640 * a_1 * V_{SCO}}{Q_i} [\%] \quad (7 - 2)$$

$$\xi_{co} = \frac{12640 * 0,000481 * 1,2614}{26140} * 100$$

$$\xi_{co} = 0,029 [\%]$$

Kde:	a_1	podíl uhlíku, který shoří nedokonale na plynnou složku CO [1]
	V_{SCO}	je objem oxidu uhelnatého $[m_N^3 * kg^{-1}]$
	12640	je výhřevnost CO $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$
	Q_i	je výhřevnost paliva $[kJ * kg^{-1}]$

7.1.2 Ztráta hořlavinou v popílku:

$$\xi_c = \frac{b * C^r * 32600}{Q_i} [\%] \quad (7 - 3)$$

$$\xi_c = \frac{0,0820 * 0,67608 * 32600}{26140} * 100$$

$$\xi_c = 6,813 [\%]$$

Kde: b je podíl uhlíku, který neshoří vůbec a odchází ze spalovacího zařízení společně s tuhými zbytky [1]
 C^r je obsah uhlíku v surovém vzorku paliva [%]
 32600 je výhřevnost uhlíku $\left[\frac{kJ}{kg} \right]$

7.1.3 Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová):

Ztráta fyzickým teplem spalin, mnohdy označovaná pojmem komínová, představuje teplo odcházející z kotle v kouřových plynech. Její velikost závisí na teplotě spalin a přebytku vzduchu ve spalinách za kotlem (řízené množství vzduchu + přísátí falešného vzduchu), kdy se zvětšováním obou parametrů ztráta roste.

$$\xi_k = \frac{V_s * \bar{c}_s * (t_k - t_0)}{Q_i} [\%] \quad (7 - 4)$$

$$\xi_k = \frac{10,44 * 1,43 * (201,6 - 20)}{26140} * 100$$

$$\xi_k = 10,2 [\%]$$

Kde: V_s je skutečný objem vlhkých spalin $[m_N^3 * kg^{-1}]$
 \bar{c}_s je střední měrná tepelná kapacita spalin vlhkých $[kJ * kg^{-1} * K^{-1}]$
 t_k je teplota spalin na výstupu $[^{\circ}C]$
 t_0 je srovnávací teplota vzduchu $[^{\circ}C]$

7.1.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Jedná se v podstatě o ztrátu fyzickým teplem popílku a strusky.

$$\xi_f = \frac{A^r * \left(\sum \frac{\chi_i * \bar{c}_{si} * (t_i - t_o)}{1 - C_i} \right)}{Q_i} [\%] \quad (7 - 5)$$

Kde:	χ_i	je hmotnostní podíl tuhých zbytků	$\left[\frac{kg}{kg} \right]$
	C_i	je nedopal, hořlavina v tuhých zbytcích	$[\%]$
	t_i	je teplota příslušného druhu tuhých zbytků	$[^{\circ}C]$
	t_o	je srovnávací teplota vzduchu	$[^{\circ}C]$
	\bar{c}_{si}	sřední měrná tepelná kapacita tuhých zbytků	$[kJ * kg^{-1} * K^{-1}]$
	A^r	je popel původní	$[\%]$

$$\xi_f = \frac{A^r * \left(\frac{\chi_1 * \bar{c}_{s1} * (t_k - t_o)}{1 - C_1} + \frac{\chi_2 * \bar{c}_{s2} * (t_p - t_o)}{1 - C_2} \right)}{Q_i}$$

Pro výpočet ztráty tuhých zbytků je potřeba vypočítat střední měrnou tepelnou kapacitu tuhých zbytků (popílku a strusky), která je počítána z rovnic 7-6, 7-7, 7-8.

Střední měrná tepelná kapacita tuhých zbytků:

$$\bar{c}_{si} = 0,712 + 0,502 * 10^{-3} * t_i [kJ * kg^{-1} * K^{-1}] \quad (7 - 6)$$

Kde: t_i je teplota příslušného druhu tuhých zbytků

Pro popílek:

$$\bar{c}_{s1} = 0,712 + 0,502 * 10^{-3} * t_k [kJ * kg^{-1} * K^{-1}] \quad (7 - 7)$$

$$\bar{c}_{s1} = 0,712 + 0,502 * 10^{-3} * 201,6$$

$$\bar{c}_{s1} = 0,813 [kJ * kg^{-1} * K^{-1}]$$

Kde: t_k je teplota spalin $[^{\circ}C]$

Pro strusku:

$$\bar{c}_{s2} = 0,712 + 0,502 * 10^{-3} * t_p [kJ * kg^{-1} * K^{-1}] \quad (7 - 8)$$

$$\bar{c}_{s2} = 0,712 + 0,502 * 10^{-3} * 600$$

$$\bar{c}_{s2} = 1,0132 [kJ * kg^{-1} * K^{-1}]$$

Kde: t_p je teplota popela [$^{\circ}C$]

Po dosazení do vzorce 7-5:

$$\xi_f = \frac{0,1637 * \left(\frac{0,9 * 0,813 * (201,6 - 20)}{1 - 0,2693} + \frac{0,1 * 1,0132 * (600 - 20)}{1 - 0,042} \right)}{26140} * 100$$

$$\xi_f = 0,153 [\%]$$

7.1.5 Ztráta sdílením tepla do okolí v závislosti na výkonu kotle:

Tato ztráta zohledňuje množství tepla, které uniká pláštěm do okolí. Závisí na kvalitě stěn izolace, způsobu oplechování, velikosti povrchu a výkonu kotle.

Tato ztráta se stanoví z nomogramů příslušné normy při známé hodnotě jmenovitého tepelného výkonu, hodnotě výkonu, při kterém se počítá účinnost a druhu spalovaného paliva.

$$\xi_{sv} = \xi_{svj} * \frac{Q_{vyrj}}{Q_{vyr}} [\%] \quad (7 - 9)$$

Kde: ξ_{svj} je ztráta sdílením tepla do okolí jmenovitá [1]

Q_{vyrj} je jmenovitý výkon kotle [MW]

Q_{vyr} je výkon kotle [MW]

ξ_{svj} se vypočítá ze vztahu:

$$\xi_{svj} = k_1 * Q_{vyrj}^{-0,35} * 10^{-2} \quad [-] \quad (7 - 10)$$

Kde hodnota konstanty k_1 je dána typem paliva:

lignit, hnědé uhlí	3,5;
černé uhlí	2,5;
olej, zemní plyn	1,5;

$$\xi_{svj} = 2,5 * 57^{-0,35} * 10^{-2}$$

$$\xi_{svj} = 6,0727 * 10^{-3} [1]$$

Pro výpočet Q_{vyr} je potřeba si zjistit entalpii napájecí vody a páry z naměřených hodnot teplot a tlaků. Entalpie byly určeny dle standartu IAPWS v programu EES (EngineeringEquationSolver).

Entalpie páry:

$$i_p = 3316 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Entalpie napájecí vody:

$$i_{NV} = 460,7 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Výpočet Q_{vyr} :

$$Q_{vyr} = m_p * (i_p - i_{NV}) [kW] \quad (7 - 11)$$

Kde: m_p je množství páry $[t * h^{-1}]$

Množství páry musíme převést do správného jednotkového tvaru.

$$m_p = 73,04 [t * h^{-1}] \quad (7 - 12)$$

$$m_p = 73,04 / 3,6$$

$$m_p = 20,288 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Dosadíme do vzorce 7-11:

$$Q_{vyr} = 20,288 * (3316 - 460,7)$$

$$Q_{vyr} = 57,928 [kW]$$

Dosadíme do vzorce 7-9:

$$\xi_{sv} = 6,0727 * 10^{-3} * \frac{57}{57,928} * 100$$

$$\xi_{sv} = 0,5975 [\%]$$

7.1.6 Celková ztráta a účinnost kotle

Ztráta:

$$\xi = \xi_{CO} + \xi_C + \xi_k + \xi_f + \xi_{sv} \quad (7 - 13)$$

$$\xi = 0,029 + 6,813 + 10,2 + 0,153 + 0,5975$$

$$\xi = \underline{\underline{17,7925 [\%]}}$$

Účinnost:

$$\eta = 1 - \sum \xi_i = 100 - \xi_{CO} - \xi_C - \xi_k - \xi_f - \xi_{sv} \quad (7 - 14)$$

$$\eta = 100 - \xi_{CO} - \xi_C - \xi_k - \xi_f - \xi_{sv}$$

$$\eta = 100 - 0,029 - 6,813 - 10,2 - 0,153 - 0,5975$$

$$\eta = \underline{\underline{82,2075 [\%]}}$$

8 Přehled možných uprav kotle pro zvýšení účinnosti a snížení emisí.

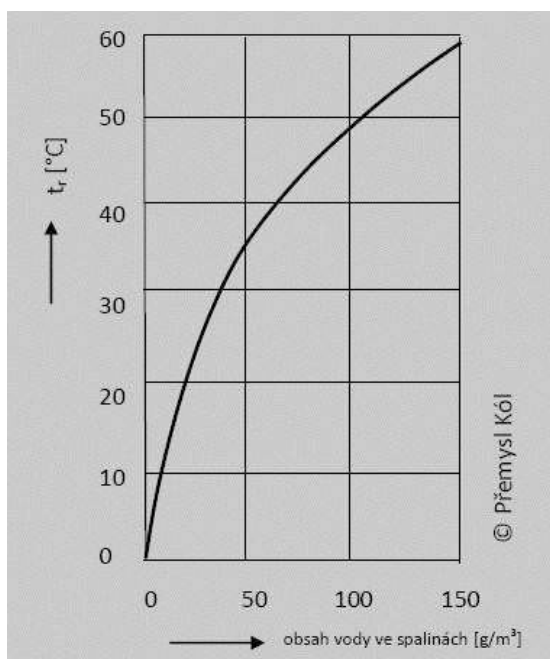
V této kapitole se budu zabývat nedostatky, které byly zjištěny při měření a výpočtu účinnosti a ztrát kotle K1 v Karviné na teplárně TČA v předešlé kapitole.

8.1 Optimalizace teploty spalin na výstupu z kotle.

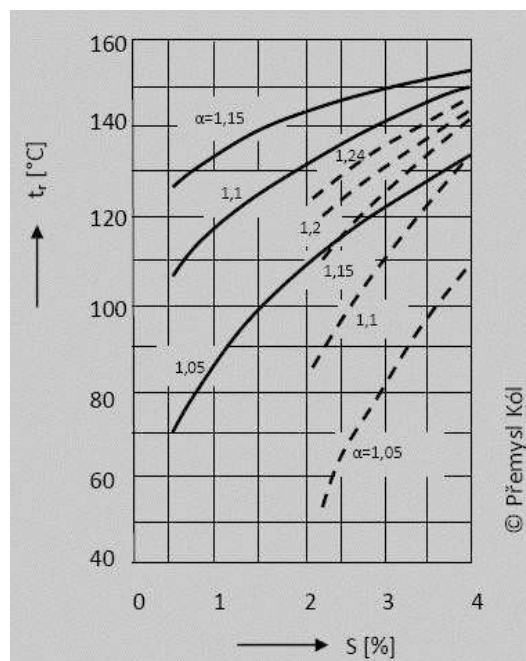
Obecně lze říct, že optimalizace teploty spalin je omezena rosným bodem kondenzujících složek spalin. Vodní pára a páry kyseliny sírové ve spalinách při teplotách spalin nižších nebo rovných rosnému bodu t_r kondenzují a způsobují korozi výhřevných ploch. Vzniklý kondenzát pohlcuje totiž CO_2 , SO_2 , popřípadě SO_3 ze spalin a tvoří s nimi kyseliny H_2CO_3 , H_2SO_3 a H_2SO_4 , které leptají povrch oceli. Spalinový kyslík pohlcený kondenzátem vyvolává elektrolytickou korozi ve vodném prostředí. Aby k této, tzv. nízkoteplotní korozi dodatkových ploch nedocházelo, musí teplota spalin v mezní vrstvě u výhřevné plochy, resp. teplota výhřevné plochy t_{st} , být vyšší než t_r .

Teplota rosného bodu závisí na druhu spalovaného paliva, zejména na obsahu vody W , vodíku H a síry S , na druhu ohniště, přebytku vzduchu a částečně též na koncentraci popílku, který působí jako kondenzační jádra.

Vliv vlhkosti na t_r je znázorněn na obr. 8.1, vliv přebytku vzduchu a obsahu síry S na obr. 8.2. Zejména vliv síry je významný. Zvýšení obsahu síry o 1% může způsobit zvýšení t_r o 20 až 50°C.



Obr. 8.1: Vliv vlhkosti na rosný bod spalin [6]



Obr. 8.2: Vliv obsahu síry v palivu a součinitele přebytku vzduchu [6]

Při měření na kotli K1, byla naměřena teplota spalin $201,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ a z tepelných bilancí vyplývá, že jmenovitý tepelný výkon kotle 57 MW_t se dosahuje pouze pro jmenovité parametry přehřáté páry a pro teplotu napájecí vody 140°C . Pro teplotu napájecí vody 110°C , která se v současné době pro napájení kotlů používá, je tepelný výkon kotle 60 MW_t . V praxi to znamená, že se při jmenovitých parametrech přehřáté páry kotel přetěžuje o 5% na tepelném výkonu a zároveň jen málo využívá regenerační ohřívák vody, což způsobuje nižší celkovou účinnost výroby elektrické energie. Navíc námi naměřená teplota ohrožuje i látkové filtry.

S ohledem na spalovaný typ paliva a obsah síry ve spalinách na výstupu z kotle lze jako optimální teplotu spalin pro kotel K1 odhadnout na $130 - 140\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teoreticky lze připustit i teplotu nižší, tj. 120°C , ale s ohledem na bezpečnost provozu a předpokládanou nižší teplotu spalin při nižším výkonu kotle, budeme teplotu 130 až 140°C považovat za teplotu jmenovitou.

Vzhledem k těmto vysokým teplotám spalín na výstupu z kotle K1 jsem uvažoval nad těmito změnami:

- Zvětšení ohříváku vzduchu
- Zvětšit jiné teplosměnné plochy
- Vybudovat v kotli jiný výměník

8.1.1 Zvětšení ohříváku vzduchu

Významem ohříváku vzduchu je urychlit sušení tuhých paliv, zmenšit komínovou ztrátu, zlepšit průběh spalování, vzněcování paliva a vlastní hoření, zvýšení spalovací teploty v ohništi a zvýšení celé teplotní úroveň v ohništi a dodatkových tazích.

Vzduch kromě paliva představuje jediné medium, kam lze předávat teplo s nízkým tepelným potenciálem (teplotou), neboť zavedením regeneračního ohřevu stoupá teplota napájecí vody na hodnoty 165 – 260°C, takže napájecí vodou lze při ekonomickém minimálním spádu ochladit spaliny jen na 210 až 300°C (mimo kotle s teplotou napájecí vody 105°C což je případ kotle K1.)

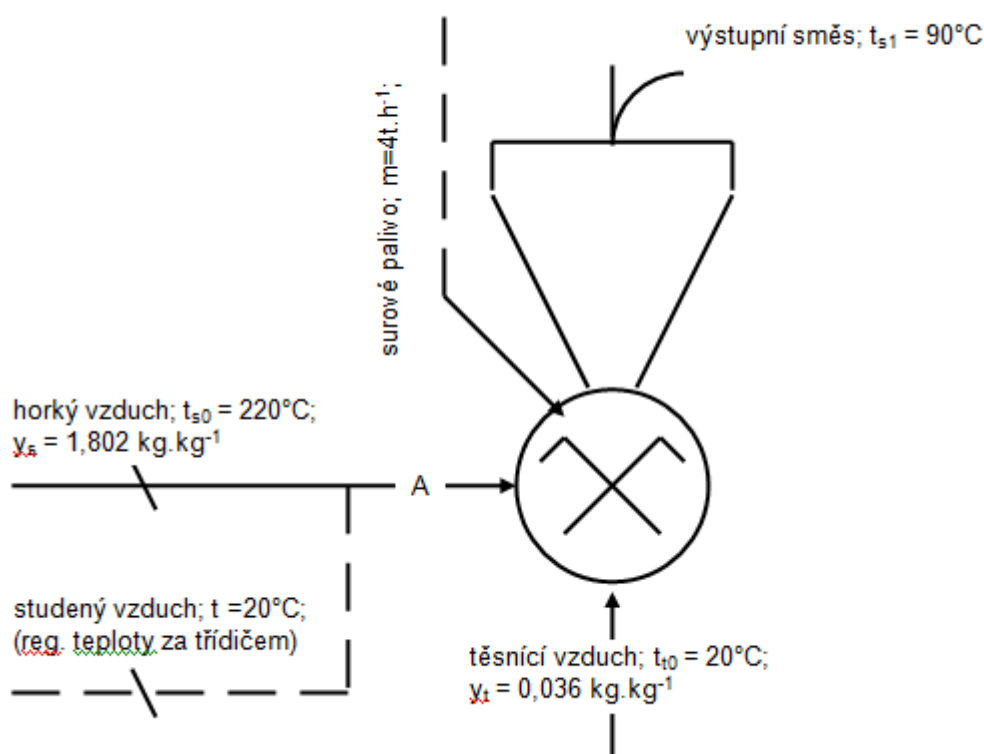
Vzhledem ke stávající konstrukci kotle a ohříváku vzduchu už nad zvětšováním ohříváku vzduchu nelze uvažovat, jelikož by se rozměrově do kotle nedostal. Musel bych změnit rozměry spalovací komory, což by bylo pro nás značně neekonomické.

8.1.2 Zvětšení jiné části (teplosměnné plochy) kotle

Zde jsem mohl uvažovat o dvou částech a to buď hadovém ohříváku vody nebo vodorovným a svislým přehřívákem páry. Jelikož se jedná se o jednotný tlakový celek kotle, tak bych musel v závislosti na sobě zvětšit všechny plochy rovnoměrně. V konečném součtu by se jednalo o značně neekonomickou úpravu, protože bych v podstatě musel navrhnout a vybudovat nový kotel.

8.1.3 Vybudování nového výměníku kotle

Jak jsem již uvedl v předchozích bodech, je v současné době výstupní teplota spalin z kotle kolem 200 °C v závislosti na výkonu kotle. Toto souvisí s množstvím vzduchu, které prochází přes ohřívák vzduchu. Pokud jsou otevřené studené klapky vzduchu do mlýnů, tak ohřívák vzduchu nevychladí spaliny. Základní toky vstupních a výstupních veličin z mlýna jsem uvedl na *obrázku 8.3*.



Obr. 8.3: Základní schéma toků vstupních a výstupních veličin mlýna E 38

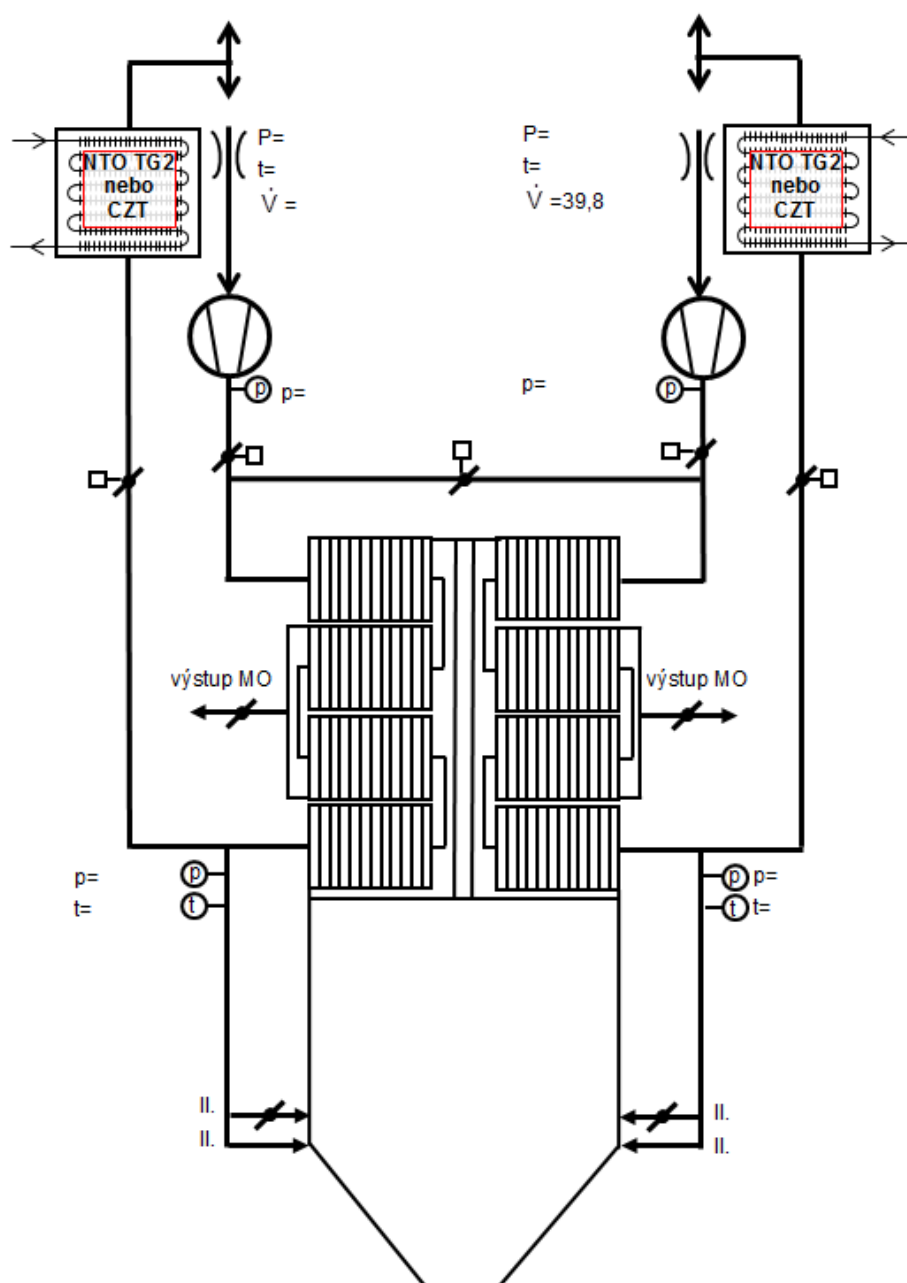
Jednou z možností, která dosud byla instalovaná na kotlích v Teplárně Karviná (nikoliv na TČA), 52 je realizování snížení odchozí teploty spalin instalací přídavných výměníků vzduch voda. Základní myšlenkou návrhu snížení teploty spalin je minimalizace zásahů do stávajícího kotle. Řešení využívá horkého vzduchu na výstupu z ohříváku vzduchu pro ohřev oběhové topné vody (zpátečky) při současném provozu obou sekundárních vzduchových ventilátorů. Pro snížení teploty spalin a vzduchu byla provedena instalace dodatečného výměníku vzduch voda v prostoru kotelny poblíž výstupu

vzduchu z ohříváku vzduchu. Základní výhodou tohoto typu výměníku vzduch voda je provoz s čistou vzdušinou bez popílku a bez nebezpečí zanášení. Toto řešení výrazně snižuje hmotnost a rozměry výměníku a vylepšuje ekonomickou reálnost návrhu. Schéma navrhovaného řešení je na *obrázku 8.4*.

Na základě měření množství vzduchu v nasávacích šachtách vzduchu si kotel přednostně vezme potřebné množství vzduchu pro spalovací proces. Přebytečné množství vzduchu je odvedeno ze vzduchového systému kotle na pravé a levé straně do přídavných výměníků. Množství vzduchu je dimenzováno tak, aby teplota spalin na výstupu z kotle nepoklesla pod zvolenou hodnotu 130 až 140°C. Množství odvedeného horkého vzduchu je rovněž měřeno na vhodném škrtícím orgánu nebo na rychlostní sondě. Odvedený horký vzduch je vychlazen ve výměníku vzduch voda, do kterého je přivedena voda odbočkou ze zpátečky horkovodu.

Výhody realizovaného řešení:

- Snížení teploty spalin na výstupu z kotle, zvýšení účinnosti kotle.
- Odpadní teplo na výstupu vzduchu z nových výměníků je možno využít pro vytápění kotelny v zimním období, nebo vrátit zpět do sání vzduchových ventilátorů. Teplárna ČSA pracuje pouze v zimním a přechodném období, což je pro teplárnu velmi aktuální s ohledem na vybourané kotle K3 až K5. Je zásadní potřeba vytápění kotelny v zimním období.
- Řešení nezasahuje do tlakového celku stávajícího kotle.
- Veškeré práce a úpravy až na konečné propojení dvou vzduchových kanálů lze provádět za provozu kotle.
- Snižuje se objem spalin na výstupu z kotle a zlepší se podmínky pro odlučování tuhých částic popílku.
- Úprava minimálně ovlivňuje řízení a regulaci stávajícího kotle.
- Řešení požaduje velmi malé prostorové nároky.



Obr. 8.4: Navrhované řešení úpravy vzduchového traktu kotle

8.2 Kyslík ve spalínách

Zde jsme naměřili průměrnou hodnotu koncentrace O_2 za kotlem K1 ve třech po sobě jdoucích odběrech na levém a pravém kanálu 7,7%. Vzhledem ke stáří kotle na TČA je takhle hodnota v pořádku, když uvážíme, že na novém zařízení se pohybujeme kolem hodnoty 5% koncentrace O_2 ve spalínách. Tedy snižováním koncentrace kyslíku ve spalínách se nemá cenu dále zabývat.

8.3 Ztráta hořlavinou ve spalínách

Jako další ztrátou jsem se zabýval hořlavinou ve spalínách tzv. chemickým nedopalem ve spalínách. Ztrátu chemickým nedopalem můžeme definovat jako část zplyněného paliva, která nestihla či nemohla dokonale shořet a uvolnit svou chemickou energii a odchází převážně ve formě oxidu uhelnatého se spaliny ven z kotle. Naměřená hodnota CO na kotli K1 je 62ppm, což je hodnota nízká a zabývat se snižováním hodnoty CO náš problém neřeší.

8.4 Ztráta hořlavinou ve strusce

Při stanovení ztráty nedopalem je nutné si uvědomit, že nespálené zbytky ve formě uhlíku se vyskytují v popelu, který opouští kotel dílem jako struska a dílem jako popílek. V tomhle bodě se zabývám hodnotou ve strusce. Naměřená hodnota nedopalu ve strusce je 4,2% a vypočítaná ztráta hořlavinou ve strusce je v řádech setin. Touto nízkou hodnotou se dále zabývat nebudu.

8.5 Ztráta citelným teplem tuhých zbytků

Podobně jako u ztráty nedopalem ve strusce jde postupovat i u ztráty fyzickým teplem tuhých zbytků. S využitím naměřených hodnot na kotli K1 popílku a strusky (stupeň zachycení) je potom již snadné se dopočíst ztráty. K výpočtu je potřeba jen znát (dopočíst) měrnou tepelnou kapacitu příslušného tuhého zbytků c_i a jeho teplotu t_i se kterou opouští kotel. Mnou vypočítaná hodnota ztráty fyzickým teplem je 0,152% a opět se jedná o nízkou hodnotu, kterou se nebudu zabývat.

8.6 Ztráta sdílením tepla do okolí

Závisí na kvalitě izolace stěn, způsobu oplechování, velikosti povrchu a výkonu kotle. Tato ztráta zohledňuje množství tepla, které uniká pláštěm do okolí. Mnou vypočítaná ztráta má hodnotu 0,598%, když opět uvážím staří kotle K1 a způsob oplechování, je tato hodnota nízká a nemá smysl nad ní dále uvažovat.

8.7 Ztráta hořlavinou v popílku

Na kotli K1 byly naměřeny vysoké hodnoty nedopalu v popílku a to 26,93% a hodnota vypočítané ztráty je 6,7% .

Velké nedopaly v popílku jsou zapříčiněny jak velkou nerovnoměrností v přívodu uhelného prášku a spalovacího vzduchu do práškových hořáků, tak nevhodnými směšovacími poměry mezi sekundárním vzduchem a primární směsí na výstupu z hořáků a nevhodným přívodem terciárního a dohořivacího vzduchu.

Velká nerovnoměrnost toku uhelného prášku v jednotlivých přívodních práškovodech k hořákům byla zjištěna již dříve při některých měřeních VŠB na kotli K1. I když byla snaha zrovnoměnit tok uhelného prášku v jednotlivých přívodních práškovodech clonkováním, nebyl tento problém doposud uspokojivě vyřešen. Podle měření VŠB dochází v práškovodech také ke kolísání rychlosti primární směsi až ± 7 m/s v časovém intervalu 3 až 5 s. Tento jev by mohl signalizovat pulzování průtoků primární směsi v důsledku malých tlakových odporů mezi paralelně zapojenými práškovody.

Nerovnoměrnost v přívodu spalovacího vzduchu do jednotlivých práškových hořáků sice nebyla v předchozích měřeních zjišťována, avšak dřívější zkušenosti ukazují, že při absenci měření množství vzduchu a nízkém tlaku horkého vzduchu za ohřívákem vzduchu lze počítat s poměrně velkými rozdíly v průtoku spalovacího vzduchu do jednotlivých práškových hořáků.

Velký vliv na včasné zapálení uhelného prášku před hořákem má také výrazně převyšující úst'ová rychlost sekundárního vzduchu nad úst'ovou rychlostí primární směsi. Jedná se o tzv. pozitivní rychlostní skluz mezi sekundárním vzduchem a primární směsí. Dle literárních údajů by měla být hodnota úst'ová rychlost primární směsi 20-25 m/s a rychlost sekundárního a terciárního vzduchu 30-40 m/s. Bohužel u kotlů K1 je rychlostní skluz mezi sekundárním vzduchem a primární směsí negativní, protože pro výkon 75 t/h přesahuje úst'ová rychlost primární směsi hodně 30 m/s a úst'ová rychlost sekundárního a terciárního vzduchu dosahuje sotva 30 m/s.

Při nižších výkonech se situace ještě zhoršuje, protože úst'ová rychlost primárního vzduchu je přibližně stejná, ale množství sekundárního vzduchu, a tím i jeho úst'ová

rychlost, je ještě menší. Vysoká rychlost primárního vzduchu je dána také snahou operátorů udržet v mlýnech dostatečnou vynášecí rychlost primárního média, aby nedocházelo k jejich zamílání. Rovněž panují obavy z usazování uhelného prášku v přímých horizontálních úsecích práškovodů. Za tohoto stavu je do výkonových uhelných hořáků přivedena poměrně chudá primární směs, která má nízkou vlastní stabilitu hoření a většinou se kotel K1 provozuje s trvalou stabilizací plynem z důlní degazace.

V důsledku negativního rychlostního skluzu dochází k pomalejšímu zapalování uhelného prášku a ke snížení intenzity hoření, což se projevuje nižší teplotou spalování a teplotními pulzacemi plamene. Situaci navíc zhoršuje skutečnost, že část spalovacího vzduchu je přiváděna terciárními dyšny, které jsou vzdáleny 1,7 m od práškových hořáků. Tím pádem část spalovacího vzduchu se dostává do jádra spalování až hluboko ve spalovací komoře.

Rovněž je zcela nevhodně navržené pásmo dohořívacího vzduchu. Za prvé je velmi nízká výstupní rychlost dohořívacího vzduchu z dyšen, která nedosahuje ani 10 m/s, takže nedochází k jeho dostatečnému zamíchání do spalín.

Nedostatečná funkčnost automatické regulace spalování nespočívá jenom ve značně nerovnoměrném přívodu uhelného prášku a spalovacího vzduchu do jednotlivých hořáků, nýbrž také v celkové koncepci práškových hořáků a terciárního a dohořívacího pásma. Jak vyplývá z předchozích rozborů, stávající koncepce spalování u kotle K1 nezaručuje celkově dobré podmínky pro proces hoření ve spalovací komoře, takže spalování se vyznačuje malou stabilitou a předvídatelností. Z toho vyplývá také obtížnější řiditelnost kotle.

Navíc průtok primárního vzduchu do jednotlivých mlýnů není měřen a regulován, takže nejsou vytvořeny stabilní podmínky ani pro vynášení uhelného prášku z mlýna. Operátoři se snaží přivádět do mlýnů raději větší množství primárního vzduchu, aby předcházeli jejich zamletí. Nadměrné množství primárního vzduchu přiváděného do mlýnů má však negativní vliv jak na jemnost mletí uhelného prášku, tak na nízkou koncentraci uhelného prášku v primární směsi.

Podle měření je v důsledku vysokých průtoků primárního sušícího vzduchu přes mlýny uhelný prášek příliš hrubý. Zbytek na síti 90 μm bývá i více jak dvojnásobný oproti původní garanci výrobcem mlýnů, která činí 25%. Podle téhož měření je koncentrace uhelného prášku v primární směsi asi o 20% a více nižší, než je udávaná doporučená hodnota, která činí 0,5 až 0,6 kg/m^3 . Trvalé udržování průtoků primárního sušícího vzduchu přes mlýny na projektovaných hodnotách by rovněž přispělo k posílení stability spalování.

9 Výběr a popis technického řešení úpravy pro kotel K1

Hlavním cílem úpravy kotle bude navržení nové koncepce spalování. Je třeba zajistit v celém regulačním rozsahu kotle K1 takový průběh spalovacího procesu, aby došlo k co nejrychlejšímu zapálení uhelného prášku a jeho maximálnímu vyhoření i ve stechiometrických podmínkách, které panují ve spalovací komoře před přívodem dohořivacího vzduchu. Zapálení uhelného prášku má být zahájeno již před hořáky, přičemž spalování má probíhat natolik rychle, aby nedocházelo k teplotní pulzaci plamene, ale aby se plameny rozvinuly do turbulentního dynamického proudu. Rovněž je velmi důležité, aby dohořivací pásmo bylo vhodně navrženo a dohořivací vzduch se včas a efektivně zamíchal do hořících plamenů. Požadovaného průběhu spalování lze docílit tehdy, když v celém regulačním rozsahu kotle jsou splněny následující podmínky:

- co nejrovnoměrnější přívod uhelného prášku a spalovacího vzduchu do jednotlivých práškových hořáků
- výstupní rychlost primární směsi z hořáků pod 20 m/s
- výstupní rychlost sekundárního vzduchu z hořáků nad 25 m/s
- vhodný způsob přívodu a rozdělení sekundárního a terciárního vzduchu do hořáků
- vhodný způsob přívodu dohořivacího vzduchu a jeho dostatečná vstupní rychlost do spalovací komory

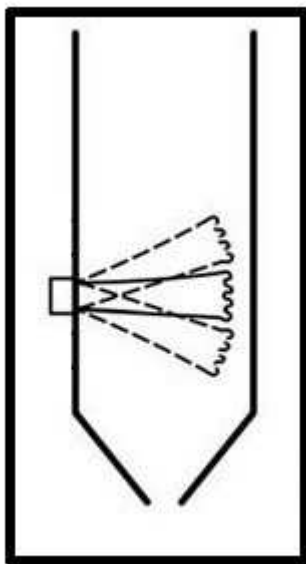
Navrženou metodou spalování, která optimálním způsobem zajišťuje rychlé a rovnoměrné hoření uhelného prášku ve stechiometrických podmínkách, lze docílit jak poměrně nízkých nedopalů v popílku, tak emisí oxidů dusíku NO_x ve spalínách. Nižší nedopaly jsou dány rovnoměrností přívodu uhelného prášku a spalovacího vzduchu do hořáků a velkou intenzitou spalovacího procesu. Nižší emise oxidů dusíku NO_x jsou dány především nízkou koncentrací kyslíku v plamenech těsně před přívodem dohořivacího vzduchu.

9.1 Natočení hořáků

Natočení hořáků se používá při požadavcích na změnu rozložení teplot v hořákové oblasti kotlů. Literární údaje informují o možnosti využití práškových hořáků s naklápěním za provozu, v ČR se však tyto hořáky na kotlích nepoužívají.

Jedním z cílů může být změna těžiště hoření a spalování. Posunutím těžiště vzhůru nebo naopak dolů viz *obr. 9.1* dochází ke zkracení nebo prodloužení spalovací dráhy. V tomto případě je ovlivněn přenos tepla do teplosměnných ploch výparníku a následujícího sálavého přehříváku. V zásadě je zde patrný vliv na přehřátí, a dále dochází ke změně parametrů spalování, které mohou ovlivnit emise a spalitelné látky v popílku. S ohledem na dosahované parametry kotle K1 jsou tyto důvody pro případnou rekonstrukci zbytečné.

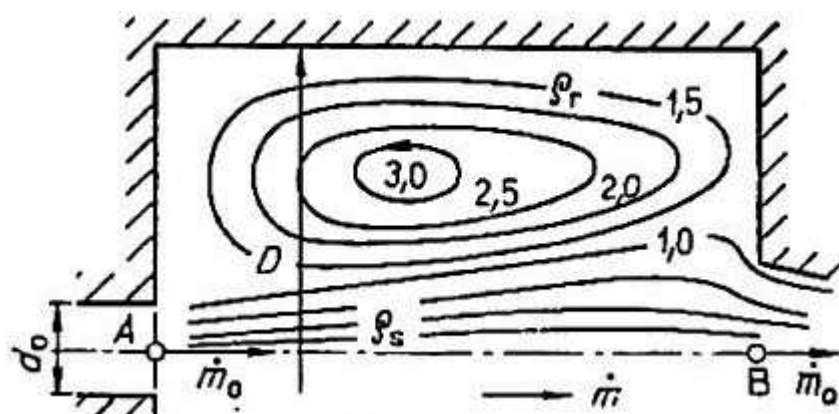
Podstatný vliv má natočení (naklopení) proudových rohových hořáků kotle K1 na struskování stěn spalovací komory v oblasti hořáků.



Obr. 9.1: Naklápění hořáků

U tohoto natočení nastává problém na straně proudu uhlého prášku primární směsi, která je blíž stěně spalovací komory. Vzdálenost plamenů od sebe a od stěn musí být dostatečná, aby nedocházelo ke slévání proudů. V jakémkoliv prostoru dochází ke zpětnému proudění (vnější recirkulace) což je patrné z *obrázku 9.2*. Problém s blízkostí

plamene a stěny spalovací komory by mohl nastat i u nově zvolené geometrie hořáků na kotli K1, kterou navrhuji v rámci diplomové práce. Z toho důvodu by docházelo ke značnému struskování stěn spalovací komory v hořákové oblasti. Řešením tohoto problému bude provést nasměrování práškových hořáků s ohledem na realizaci nové koncepce spalování, při které se dělí spalovací vzduch přivedený do hořáku na sekundární a terciární část.

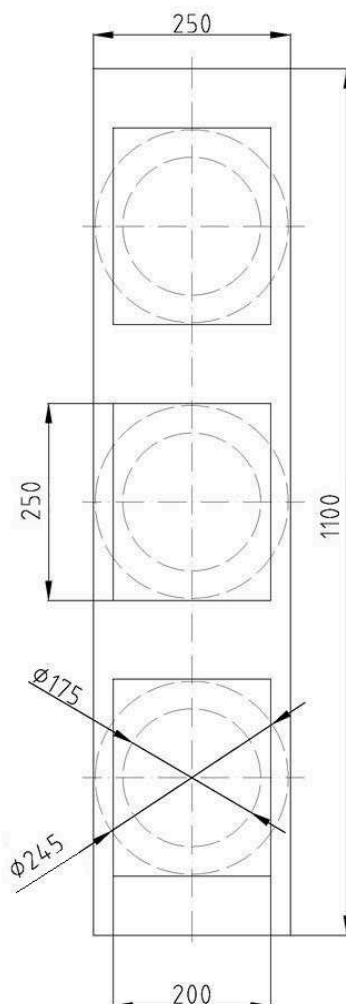


Obr. 9.2: Zpětné proudění v prostoru[7]

Problématickou struskování v závislosti na natočení hořáku na kružnici jsem zjišťoval ještě na dalších kotlích a to konkrétně:

- na elektrárně Dětmárovice, kde je zavíření rohových hořáku 15° a kotel nestruskuje
- na teplárně Karviná na kotli K3, kde je zavíření hořáku 30° a zde ke struskování již dochází

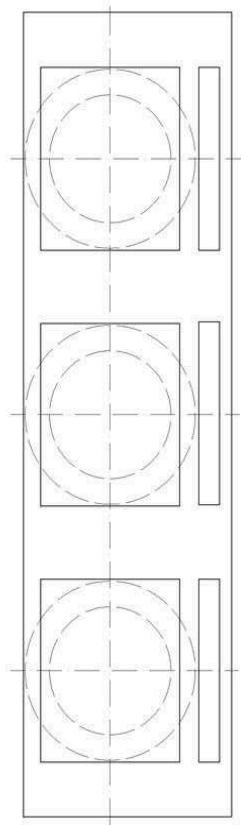
Stávající princip rohových hořáků na TČA na kotli K1 je takový, že každý má tři nad sebou umístěné primární části hořáku s obdélníkovým výstupem 250x200 mm. Všechny tři primární části hořáků jsou situovány v jedné vzduchové dyšně o rozměru 250x1100 mm. Rozměr stávajících čedičových vložek do práškovodů je $\varnothing 245 \times 35$ mm, tzn., že jejich vnitřní průměr je $\varnothing 175$ mm viz. obrázek 9.3.



Obr. 9.3: Současný princip hořáků

Výměnu práškových hořáků je nutno provést s ohledem na realizaci nové koncepce spalování, při které se dělí spalovací vzduch přivedený do hořáku na sekundární a terciární část viz. obrázek 9.4. Vhodné umístění a přivedení terciárního spalovacího vzduchu na stranu ke stěně spalovací komory zabrání k víření plamene na stěnu spalovací komory a tím pádem i problému struskování a vznikání nánosů na stěně.

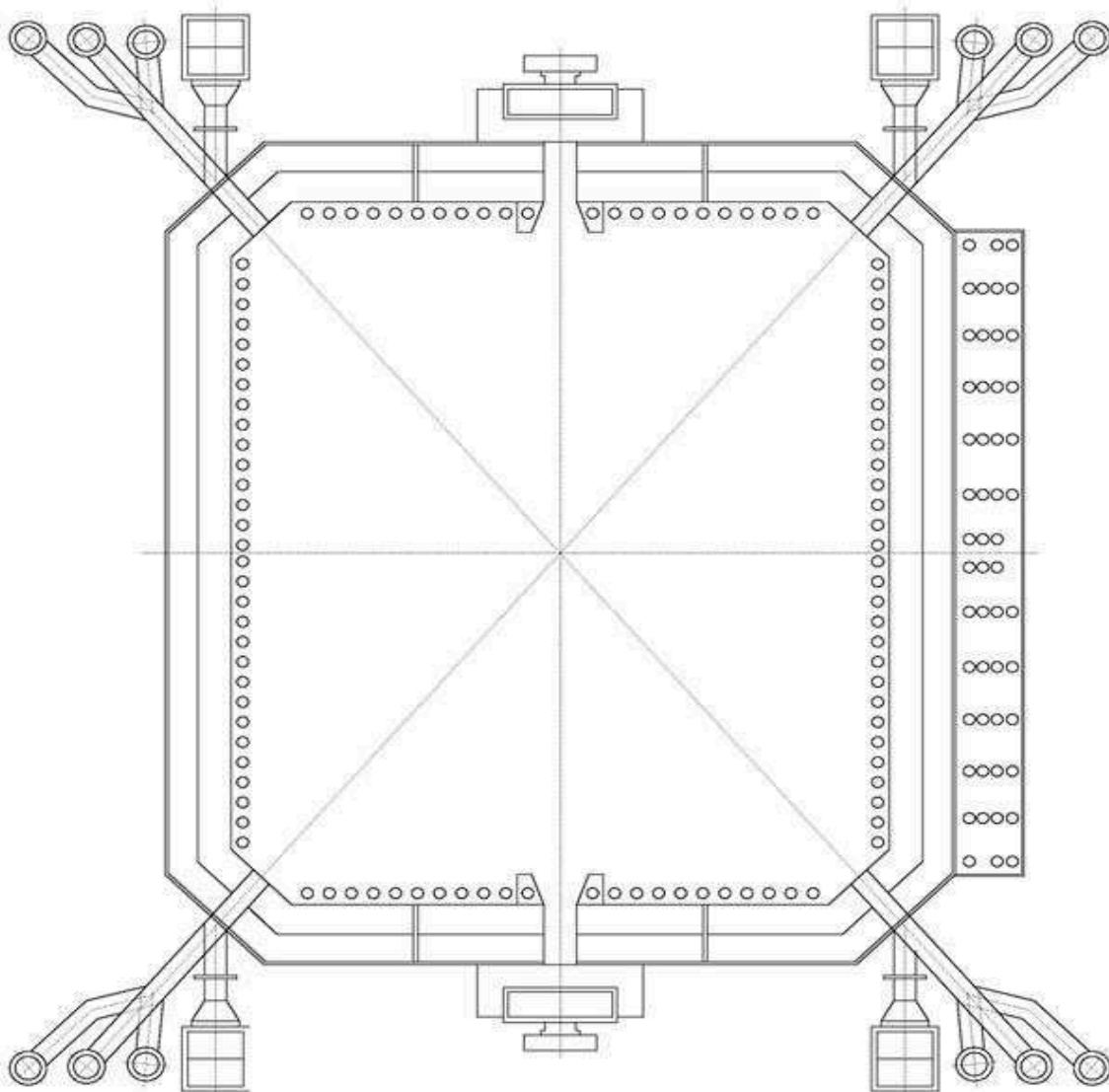
Instalace nových dyšen dohořivacího vzduchu je nezbytně nutná, protože stávající provedení není vhodné jak z hlediska tvaru a velikosti průřezu dyšen, tak z hlediska jejich umístění ve spalovací komoře.



Obr. 9.4: Rozdělení vzduchu na sekundární a terciární

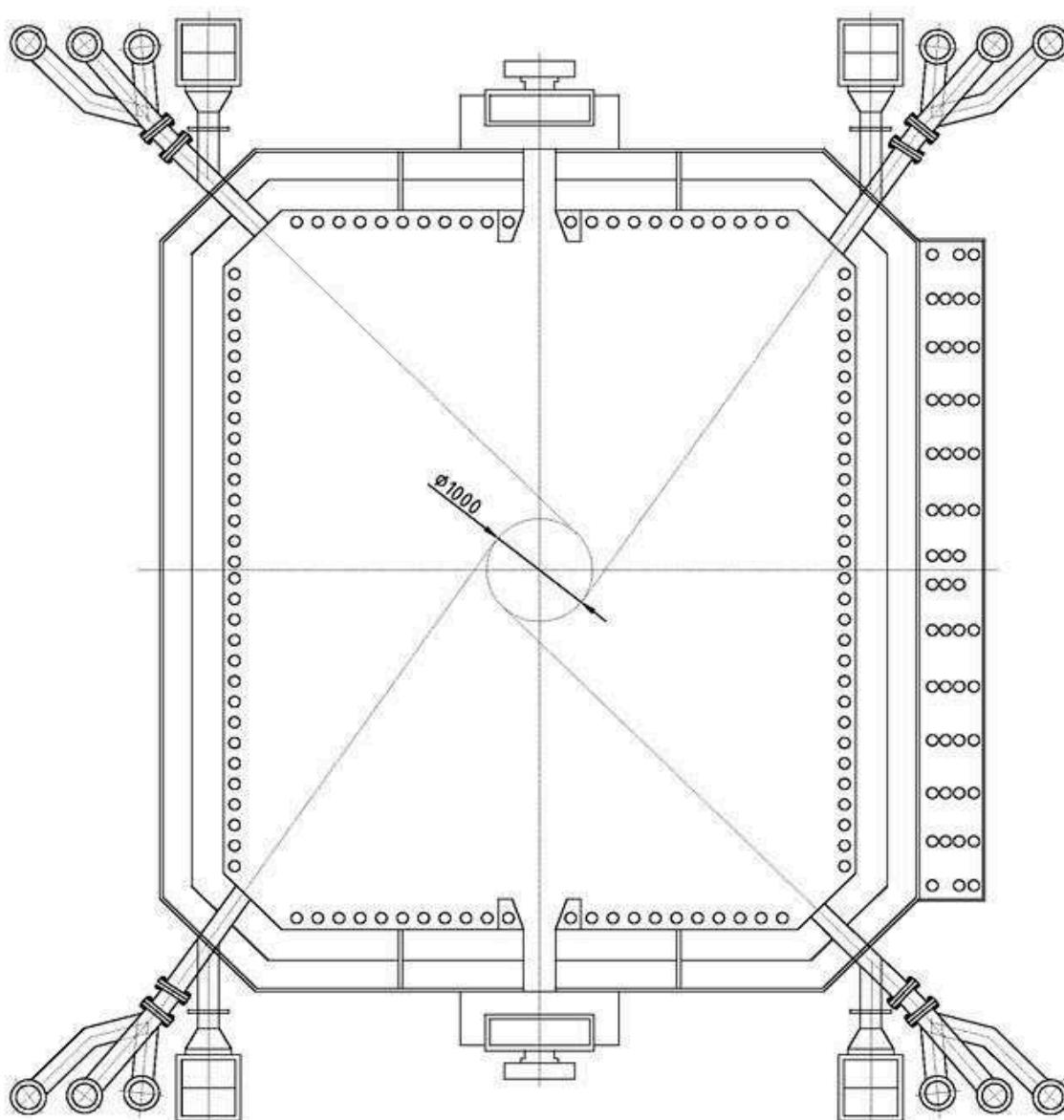
9.2 Navržení natočení hořáků

Nově navržená metoda spalování bude spočívat v nové geometrii natočení hořáků. Současný stav geometrie je takový, že hořáky na kotli K1 směřují na střed spalovací komory což je patrné ze *obrázku 9.5*. Obrázek 9.5 je i součástí přílohy diplomové práce jako výkres. Principem navrhované úpravy tedy bude, jak již bylo zmíněno, takové natočení hořáků, aby se jednotlivé plameny rozvinuly do turbulentního dynamického proudu a nedocházelo pouze k teplotní pulzaci plamene.



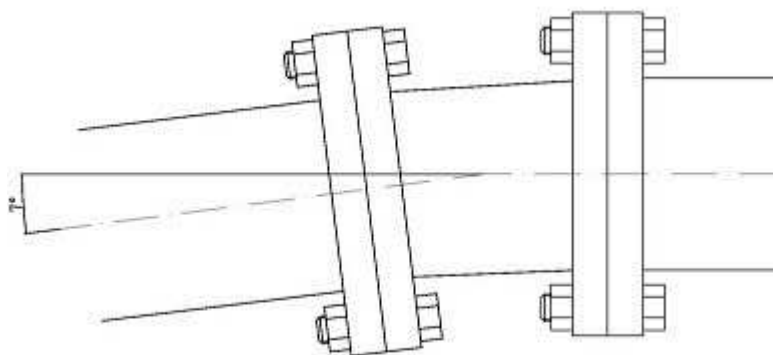
Obr. 9.5: Současný stav spalovací komory

Natočení jednotlivých hořáku jsem zvolil a provedl tangenciálně na pomyslnou kružnici ve středu spalovací komory, tento způsob natočení na kružnici je již používán na teplárně ČSA a to konkrétně na kotli K2 a dosahuje se zde lepších výsledku než právě na mnou upravovaném kotli K1. Pomyslnou kružnici ve středu spalovací komory jsem zvolil o průměru 1000mm (viz. obrázek 9.6.). Ve výsledku bude posun každého hořáku o 7°. Obrázek 9.6 je také součástí přílohy jako výkres.



Obr. 9.6: Stav spalovací komory po natočení hořáků

Další problém u mnou navrhované úpravy nastává v samém natočení hořáku. Natočení bude provedeno tak, že práškovod hořáku bude rozřezán na dvou místech a pomocí dvou armatur jsem vytvořil koleno které má sklon 7° viz obrázek 9.7. Zde může nastávat komplikace s vytrřid'ováním a nerovnoměrném toku uhelného prášku s nosným vzduchem.

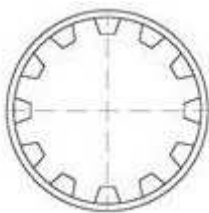


Obr. 9.7: Upravený práškovod

Tvorba stabilní homogenní směsi uhelného prášku s nosným vzduchem u práškových hořáků činí potíže pro velkou rozdílnost hustoty uhlí a vzduchu ($\rho_u : \rho_v \approx 10^3 : 1$), proto v práškovodech a hořácích dochází snadno při proudění vlivem tíže, odstředivých a setrvačných sil k vytrřidování prášku, a tím k nerovnoměrnostem koncentrací v průtočných průřezích. Proto je jedním ze základních úkolů navržení hořáku tak, aby k vytrřidování docházelo co nejméně. Znamená to vyhýbat se pokud možno vodorovným úsekům práškovodů, kolenům a průřezům s velkým výškovým rozměrem. K zrovnoměnění uhelného prášku se využívá např. rozvířovací mříže, usměrňovacích plechů, šroubových vířičů, odrazových desek apod.

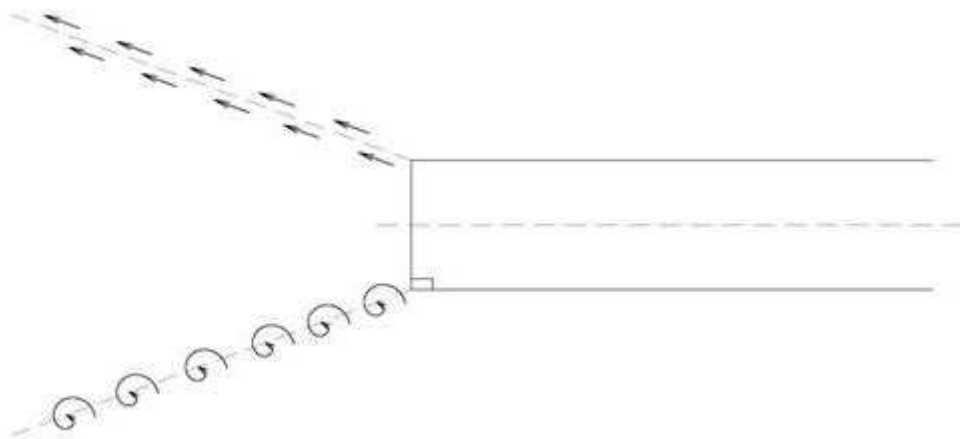
Ještě jedním z problémů, zejména proudových hořáků na černé uhlí, je stabilita hoření. Zapálení proudu primární směsi se realizuje pomocí recirkulačních proudů. Proudové hořáky mají pouze vnější recirkulaci, vířivé hořáky mají vnější a vnitřní recirkulaci. Z tohoto pohledu je stabilita spalování a přísun tepla do zapalovací zóny hořáků výrazně vyšší u vířivých hořáků. U proudových hořáků je pro zdárný vývin vnější recirkulace důležité, aby proud primární směsi směřoval do volného prostoru, kde je možné počítat s bezproblémovým vznikem vnějších recirkulačních proudů. Recirkulační proudy jsou důležité zejména pro přívod tepla a teplé hmoty do proudu primární směsi na výstupu z hořáků. Přívodem tepla dochází ke stabilizaci hoření, je však nutno říci, že dochází ke snižování koncentrace kyslíku v proudu. Následně je přívod vzduchu s potřebným kyslíkem zajišťován sekundárními a terciálními přívody vzduchu. Vířivé hořáky jsou dražší než proudové, proto se používají pro stabilizaci v obtížných podmínkách a pro hůře zapálitelné uhlí.

Jednou z možností jak intenzifikovat přenos tepla do zapalovací zóny hořáků je instalace vířivých vložek přímo do ústí hořáku. Z toho důvodu navrhuji použít po celém obvodu ozubení z těchto vložek dle *obrázku 9.8* a tím simulovat funkci vířivého hořáku. Ozubení je potřeba provést z kvalitního a otěruvzdorného materiálu z důvodu toku uhelného prášku. Stabilita hoření závisí na recirkulačních proudcích, kterého dosáhnou za použití téhle technologie. Díky použitému ozubení se zlepší transport tepla z recirkulačního proudu do proudu uhelného prášku.



*Obr. 9.8: Navržené ozubení po
obvodu ustí hořáku*

Princip tohoto ozubení a vznik recirkulačních proudů je znázorněn na *obrázku 9.9*, kde je vidět rozdíl proudu s ozubením a bez ozubení.



*Obr. 9.9: Vznik recirkulačních
proudu s ozubením*

9.3 Cíle natočení hořáku na kružnici

- doba setrvání uhelného prášku a spalin zůstává ve spalovací komoře nezměněna
- vlivem rotace při natočení hořáku dojde k prodloužení spalovací dráhy alepší se podmínky pro vyhoření uhelného prášku
- vlivem víření uhelného prášku z důvodu natočení hořáků dojde ke zrovnoměrnění teplot v celé výšce spalovací komory a nebude docházet ke slévání plamene se stěnou spalovací komory. Tím pádem se předejde i struskování na stěně spalovací komory.

10 Technicko-ekonomické zhodnocení přínosu rekonstrukce

Provedené úpravy na kotli K1 v Teplárně ČSA v Karviné za účelem zlepšení průběhu spalování. Důvodem je zajistit v celém regulačním rozsahu kotle K1 takový průběh spalovacího procesu, aby došlo k co nejrychlejšímu zapálení uhelného prášku a jeho maximálnímu vyhoření i v přibližně stechiometrických podmínkách, které panují ve spalovací komoře před přívodem dohořívacího vzduchu. Můj návrh spočívá, jak je popsáno v předešlé kapitole, na principu nové geometrie hořáků.

Z mé vypracované práce vyplývá, že účinnost stávajícího kotle K1 je poměrně nízká (pro výkon 75 t/h průměrně cca 84,5%) a že je reálné ji zvětšit vhodnými úpravami kotle. Navržené úpravy kotle však nezajišťují jenom vyšší účinnost při jmenovitém výkonu, ale také i při dílčích výkonech, kdy se účinnost kotlů snižuje jenom pozvolna, přibližně o 1 až 2%. Podle garančních měření VŠB se u stávajícího kotle účinnost s výkonem snižuje podstatně rychleji, což znamená, že ve skutečnosti jsou kotle provozovány s výrazně nižší účinností, než je průměrná hodnota 84,5%, protože kotle jsou v provozu po většinu doby na podstatně nižších výkonech, než je 75 t/h.

Přínosem rekonstrukce je prodloužení spalovací dráhy vlivem zavírání proudů, což má za následek zlepšení podmínek pro vyhoření uhelného prášku a tím snížení ztrát. Vlivem rekonstrukce dojde i k zrovnoměnění teplot v celé výšce spalovací komory a nebude docházet ke slevání proudu uhelného prášku se stěny spalovací komory, což bude mít za následek snížení struskových nánosů na stěnách.

Odhadované náklady vzhledem k úpravám, které budou potřeba na kotli provést činí cca 1,5 mil. Kč. V nákladech jsou již zahrnuty jak dělnické práce, tak i potřebný materiál na úpravu hořáku.

11 Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout úpravy kotle K1 na Teplárně ČSA v Karviné za účelem zvýšení účinnosti a snížení emisí.

Z práce, která se skládá z teoretické části, kde je sepsána historie teplárny a popis stávajícího kotle a praktické části, kde v první řadě byl proveden výpočet ztrát a účinnosti dle normy ČSN 070302 a následné zhodnocení všech ztrát, vyplývá jako nejlepší volba za účelem zvýšení účinnosti úprava spalovacího procesu.

Navrhovaná úprava spalovacího procesu, spočívá v nové geometrii hořáku. Principem nové geometrie je natočení hořáku na kružnici za účelem dosažení lepšího spalovacího procesu. Tato úprav je motivována rovněž výsledky, kterých dosahuje sousední kotle K2, který má provedeno uvedené natočení hořáků.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Bohumíru Čechovi za účinnou metodickou, pedagogickou, odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Ostravě: 19. 5. 2014

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Bohus', is written over a horizontal dotted line.

(podpis autora)

12 Seznam obrázků a tabulek

Obr. 2.1	Díl ČSA.....	15
Obr. 2.2	Teplárna Čs. Armády v současnosti.....	15
Obr. 3.1	Pohled na mlýn typu Fuller E38.....	17
Obr. 3.2	Pohled na lopatky třídiče z vnitřní strany přes návratovou klapku.....	17
Obr. 5.1	Obecné schéma energetické bilance parního kotle dle ČSN 07 0302.....	27
Obr. 8.1	Vliv vlhkosti na rosný bod spalin.....	50
Obr. 8.2	Vliv obsahu síry v palivu a součinitele přebytku vzduchu.....	50
Obr. 8.3	Základní schéma toků vstupních a výstupních veličin mlýna E 38.....	52
Obr. 8.4	Navrhované řešení úpravy vzduchového traktu kotle.....	54
Obr. 9.1	Naklápění hořáku.....	60
Obr. 9.2	Zpětné proudění v prostoru.....	61
Obr. 9.3	Současný princip hořáků.....	62
Obr. 9.4	Rozdělení vzduchu na sekundární a terciární.....	63
Obr. 9.5	Stav spalovací komory po natočení hořáků.....	64
Obr. 9.6	Stav spalovací komory po natočení hořáků.....	65
Obr. 9.7	Upravený práškovod.....	65
Obr. 9.8	Navržené ozubení po obvodu ustí hořáku.....	67
Obr. 9.9	Vznik recirkulačních proudů s ozubením.....	67
Tab. 6.1	Přehled parametrů kotle K1.....	29
Tab. 6.2	Přehled hodnot černého uhlí z kotle K1.....	29
Tab. 6.3	Parciální tlak v závislosti na teplotě.....	31
Tab. 6.4	Koeficienty A(I), B(I), C(I) složek spalin a vzduchu.....	40

13 Seznam použité literatury

- [1] HUB, F. KRUŽÍK, J. VESELKSKÝ, J. *Moravskoslezské teplárny: 100 let služeb veřejnosti*. Ostrava : Moravskoslezské teplárny, 1998. 110 s. ISBN 80-238-2293-4
- [2] ODS-Karviná [online]. c2010, [cit. 2014-2-16] Dostupné z:
<<http://www.ods-karvina.cz/clanky/2008/dul-csa-po-otresu-setri-se-priciny.php>>.
- [3] AllTravels [online]. c2014, [cit. 2014-03-11] Dostupné z:
<<http://www.alltravels.com/czech-republic/moravskoslezsky/sovinec/photos/current-photo-82216541>>.
- [4] ČSN 07 0302. *Přejímací zkoušky parních kotlů*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 52s.
- [5] DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. PRAHA: ČVUT, 2007. 212 s.
- [6] KÓL, P. Dynamika spalování [online]. c2011, [cit. 2014-04-10] Dostupné z:
<<http://spalovaci-procesy.wz.cz/Spaliny.html>>.
- [7] ČERNÝ, V. *Parní kotle*. Praha: SNTL, 1983. 858 s.

14 Seznam příloh

Příloha č. 1: Výsledky rozborů surového uhlí, škváry a popílku (Počet stran: 1)

Příloha č. 2: Výkres současného stavu spalovací komory (Počet stran: 1)

Příloha č. 3: Výkres stavu spalovací komory po natočení hořáků (Počet stran: 1)